

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroenergetiky**

**Akumulace obnovitelné energie do vodíku**

**Storage of renewable energy into hydrogen**

## ***Prohlášení***

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně.

Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

## ***Poděkování***

Děkuji Ing. Petru Moldříkovi Ph.D., vedoucímu této bakalářské práce, za poskytnutí odborného vedení.

Děkuji Ing. Danielu Minaříkovi, za odbornou pomoc při experimentální části této diplomové práci v laboratoři VŠB-TUO.

## ***Abstrakt***

V této diplomové práci se zabývám možnostmi akumulace energie získané z obnovitelných zdrojů, se zaměřením na akumulaci obnovitelné elektrické energie do vodíku. Jako experimentální součást mé diplomové práce je měření na metal-hydridovém zásobníku, který je variantou ke skladování vodíku. Při měření se zaměřím na dobu nabíjení metal-hydridového zásobníku, velikost tlaku potřebného k plnění metal-hydridového zásobníku a s tímto související spotřeby elektrické energie a určení účinností jako celého systému této akumulace elektrické energie, tak i účinností jednotlivých zařízení, potřebných k tomuto experimentu.

Pro zmíněné témata určuji jejich výhodnost, pomocí multikriteriální analýzy, a to jak pro uskladnění vodíku různými způsoby, kde porovnávám uskladnění v tlakových lahvích, v metal-hydridech a v kapalně fázi vodíku, tak pro některé možnosti akumulace elektrické energie, srovnáním olověných baterií, flow baterií, superkapacitorů a vodíkového systému.

## ***Abstract***

In this diploma thesis I will resolve storage renewable energy, focusing on the storage of renewable energy into hydrogen. As the experimental part of my thesis is to measure the metal-hydride storage, which is a variant of hydrogen storage. The measurements focus on the charging metal-hydride storage, the amount of pressure needed to carry out metal-hydride storage and the related energy consumption and determine the effectiveness of the system as the accumulation of power, and efficiency of equipment needed for this experiment.

For the aforementioned issues will determine their profitability, through multi-criteria analysis, both for the storage of hydrogen in different ways, where I will compare the storage of cylinders, in metal-hydride hydrogen and liquid phase, and for some the possibility of accumulation of electrical energy, by comparing the lead-acid batteries, flow batteries, super capacitors and hydrogen system.

## ***Klíčová slova***

Obnovitelné zdroje energie, metal-hydridový zásobník, vodík, plnění metal-hydridového zásobníku, vybíjení metal-hydridového zásobníku, skladování vodíku, multikriteriální analýza

## ***Passwords***

Renewable source of energy, metal-hydride storage, hydrogen, absorption of metal-hydride storage, desorption of metal-hydride storage, hydrogen storage, multicriterial analyses

## Obsah

Úvod.....	1
1 Druhy obnovitelných zdrojů energie (OZE).....	2
1.1 Solární energie.....	2
1.1.1 Přeměna sluneční energie na elektrickou .....	2
1.1.2 Účinnost a MPP fotovoltaických článků .....	3
1.1.3 Typy fotovoltaických článků .....	4
1.2 Větrná energie .....	5
1.2.1 Historie využití energie větru včera a dnes.....	5
1.2.2 Využití větrné energie.....	5
1.2.3 Beaufortova stupnice .....	7
1.2.4 Betzův výkonnostní koeficient .....	7
1.3 Větrné elektrárny.....	8
1.4 Energie vody .....	10
1.4.1 Teplo vody.....	10
1.4.2 Gravitační energie vody.....	10
1.4.3 Pohybová energie vody .....	10
1.5 Geotermální energie .....	11
1.6 Energie z chladu .....	12
1.6.1 Tepelné čerpadlo.....	12
1.7 Energie z přírody .....	13
2 Problematika provozu elektráren využívajících OZE a jejich začlenění do elektrizační soustavy	13
2.1 Problematika provozu solárních elektráren .....	14
2.2 Problematika provozu větrných elektráren.....	16
2.2.1 Vlivy větrných elektráren na provoz elektrizační soustavy .....	17
2.2.2 Připojení větrné elektrárny do distribuční sítě.....	17
3 Systémy pro akumulaci energie se zaměřením na vodíkové technologie .....	18
3.1 Výroba vodíku.....	18
3.1.1 Výroba vodíku elektrolýzou vody .....	18
3.1.2 Popis elektrolyzéry .....	19
3.1.3 Výroba vodíku vysokoteplotní elektrolýzou .....	20
3.1.4 Výroba vodíku termochemickými cykly .....	20
3.2 Výroba elektrické energie pomocí vodíkových technologií.....	21
3.2.1 Palivové články.....	21
3.2.2 Typy palivových článků .....	22
3.3 Přecherčávací vodní elektrárna .....	26
3.4 Elektrochemické akumulátory.....	27
3.4.1 Olověné akumulátory .....	27
3.4.2 Alkalické akumulátory .....	28
Setrvačnick .....	29
3.5 Superkondenzátor.....	29
3.6 CAES.....	30
3.7 VRB.....	31
3.8 Ostrovní režim.....	32
4 Možnosti uskladnění vodíku.....	33

4.1	Tlakové láhve .....	34
4.2	Kapalný vodík .....	34
4.3	Metalhydridy .....	35
5	Metal-hydrid na VŠB-TUO .....	36
5.1	Popis laboratoře VŠB-TUO .....	36
5.2	Popis Metal-hydridového zásobníku .....	37
5.3	Chlazení metal-hydridového zásobníku .....	38
5.4	Měření na metal-hydridovém zásobníku .....	40
5.4.1	Popis nabíjení metal-hydridového zásobníku .....	40
5.4.2	1. nabíjení metal-hydridového zásobníku vodíkem z elektrolyzérů .....	42
5.4.3	1. vybíjení metal-hydridového zásobníku do palivového článku NEXA .....	43
5.4.4	2. nabíjení metal-hydridového zásobníku vodíkem z elektrolyzérů .....	44
5.4.5	2. vybíjení metal-hydridového zásobníku do palivového článku NEXA .....	45
5.4.6	3. nabíjení metal-hydridového zásobníku vodíkem z tlakových lahví .....	50
5.4.7	3. vybíjení metal-hydridového zásobníku do palivového článku NEXA .....	52
5.4.8	4. nabíjení metal-hydridového zásobníku z tlakových lahví .....	55
5.4.9	4. vybíjení metal-hydridového zásobníku do palivového článku NEXA .....	58
6	Multikriteriální analýza .....	62
6.1	Teorie multikriteriální analýzy .....	62
6.1.1	Saatyho metoda .....	63
6.1.2	Metoda WSA .....	63
6.1.3	Metoda TOPSIS .....	64
6.1.4	Výběr optimální varianty pro uskladnění vodíku .....	65
6.1.5	Výběr optimální varianty pro akumulaci elektrické energie .....	67
	Zhodnocení měření a multikriteriálních analýz .....	71
	Závěr .....	72
	Použitá literatura .....	73
	Seznam obrázků .....	76
	Seznam tabulek .....	77
	Seznam příloh .....	78

## Úvod

Energie je zboží jako každé jiné, málokoho proto překvapí, že i k výrobě energie je potřeba energie. Těžba, úprava a doprava energetických zdrojů - ke všemu je nutno dodat energii. Plyn je do potrubí nutno natlačit kompresorem, černé uhlí je třeba vydolovat a dopravit na povrch a následně do elektrárny. Ropa je použitelná až po destilaci na jednotlivé frakce, z uhlí se po vytěžení odstraňuje přimíšená hlušina atd.

Náklady na těžbu a zpracování surovin a paliv stoupají. Naproti tomu investiční náklady větrných a fotovoltaických elektráren klesají. Ceny elektřiny z obnovitelných zdrojů jsou prozatím vyšší než ceny konvenční elektřiny. Budou-li však uvedené trendy pokračovat, je pouze otázkou času, kdy se setkají. I přesto mají obnovitelné zdroje energie své nevýhody, jako například pravidelnost dodávky.

Otázku kolísavého výkonu v sítích s vysokým podílem obnovitelných zdrojů lze řešit několika způsoby. Nejnákladnější možností je udržovat v tzv. horké rezervě konvenční záložní zdroj, případně zdroj na biomasu nebo bioplyn. Další možností je akumulace energie do vodíku, což bude podrobněji rozebráno v jiné kapitole. Jiným způsobem je využít k vyrovnání produkce vodní elektrárny, jak přečerpávací, tak akumulární, případně použít jiné způsoby akumulace energie. Zajímavá je například myšlenka zpracování bioplynu na tzv. biometan a jeho distribuce a skladování ve stávající infrastruktuře pro zemní plyn s následným využitím v kogeneračních jednotkách

Do budoucna lze s vysokou pravděpodobností předpokládat, že se setká klesající cena elektřiny z obnovitelných zdrojů s rostoucí cenou elektřiny z konvenčních zdrojů. Pro fotovoltaiku se očekává, že k dosažení tzv. parity s cenou špičkové elektřiny dojde v jižní Evropě v příštím desetiletí, ve střední a severní Evropě spíše až po roce 2020. Zhruba o deset let později dojde k vyrovnání cen fotovoltaické elektřiny s elektřinou základního zatížení. [8]

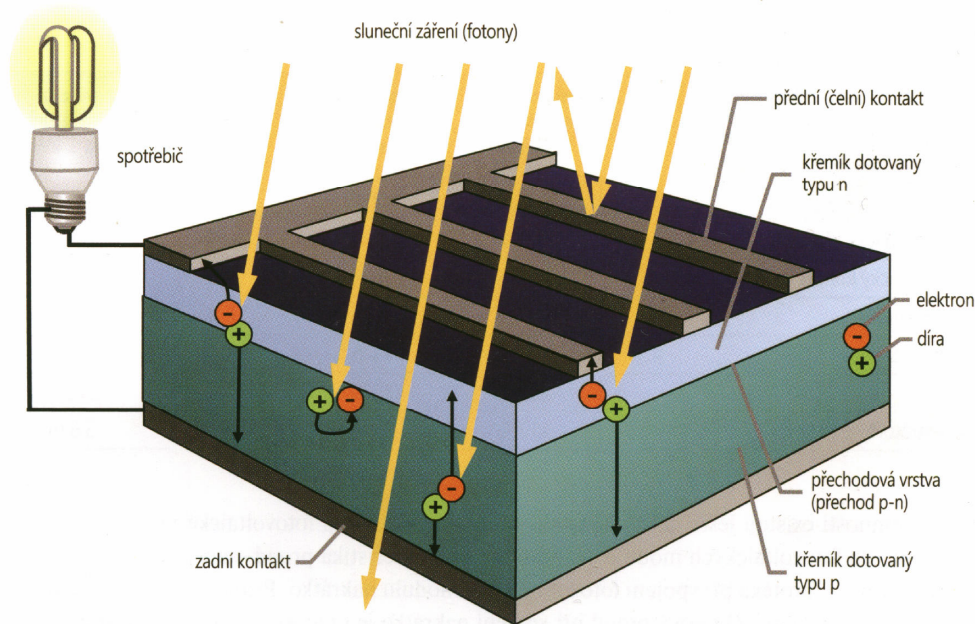
## **1 Druhy obnovitelných zdrojů energie (OZE)**

### **1.1 Solární energie**

Celosvětová spotřeba energie je dnes asi 13 TW. Slunce dodává na Zemi neustále 180 000 TW čisté, nevyčerpatelné a kvalitní energie. Otázkou však je, jak tuto energii efektivně využít a zároveň přeměnit na energii elektrickou.[9] Tohoto dosáhneme ve fotovoltaických článcích, jejich účinnost je až poměrně malá, pohybuje se okolo 20 %. V laboratorních podmínkách až 25%. [9]

#### **1.1.1 Přeměna sluneční energie na elektrickou**

Fungování fotovoltaického článku je poměrně složitá záležitost. Nejvhodnějším materiálem pro výrobu takového článku jsou polovodiče, resp. křemík, který musí být dotován různými přísadami a rozděluje se pak na polovodič typu n nebo polovodič typu p. K takovému „znečišťování“ se používají prvky fosfor a bróm, které mají rozdílné počty elektronů a vytvářejí tak nutný spád pro odevzdání elektrické energie. Struktura a fungování fotovoltaického článku je znázorněna na Obr. 1.[1]



Obr. 1 – Struktura a fungování fotovoltaického článku [1]

Mezi oběma vrstvami křemíkového řezu je hraniční, tzv. přechodová vrstva s oblastí prostorového náboje. Světlo ve formě fotonů rozděljuje částice se záporným nábojem – elektrony a částice s kladným nábojem – díry. Takto je zajištěno, že se elektrony v druhé hladině mohou volně pohybovat. Díry jsou rovněž pohyblivé. Při průchodu oblastí prostorového náboje se elektrony a díry oddělí. Tenké přední (čelní) kontakty pak shromažďují elektrony na přední straně článku. Je-li energie fotonů příliš nízká, vrací se elektron zpátky do díry. Jestliže je energie naopak příliš vysoká, využije se pouze její část, která je potřebná k oddělení elektronu od díry. [1]

### 1.1.2 Účinnost a MPP fotovoltaických článků

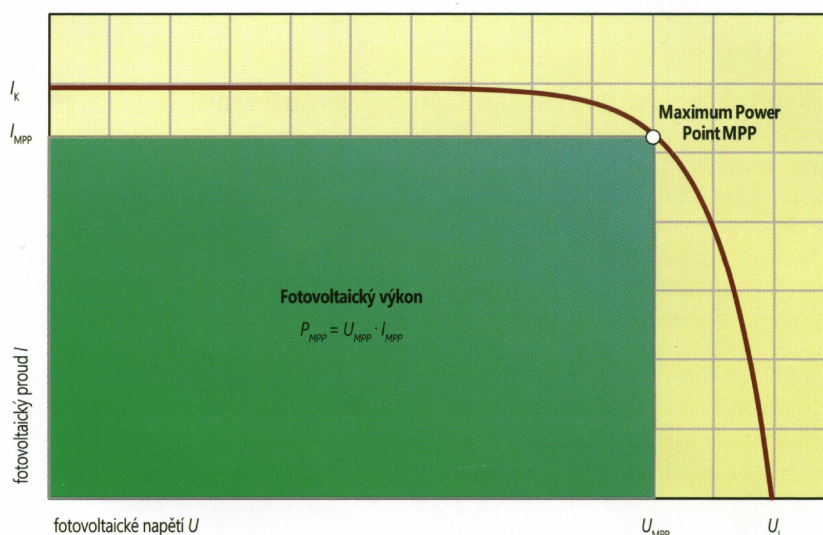
Účinnost fotovoltaických článku udává, jaký podíl slunečního záření se přemění na elektrický výkon.

$$\eta = \frac{P_{el}}{\Phi} \quad (\%; W, W) \quad (1.1)$$

kde:  $P_{el}$  ... výstupní elektrický výkon  
 $\Phi$  ... je vstupní energie slunečního záření

Čím je vyšší účinnost, tím větší výkon na  $m^2$  může solární článek vyrobit. Kromě zvolených materiálů má při výrobě rozhodující vliv kvalita. Sériově vyráběné křemíkové články dosahují již zmíněné účinnosti do 20 %. Jsou však i články, tzv. koncentrátorové, které dosahují účinnosti 35%. Koncentrátorové typy článků sluneční světlo zrcadly a čočkami soustřeďují, sice dosahují vysoké účinnosti, ale v porovnání s křemíkovými články jsou mnohonásobně dražší.[1]

MPP, nebo-li Maximum Power Point ( bod maximálního výkonu ), je další důležitý ukazatel, charakterizující fotovoltaický článek. Tento bod je zobrazen na Obr. 2 na charakteristické křivce proud-napětí.[1]



Obr. 2 – Charakteristická křivka proud-napětí fotovoltaického článku [1]

Napětí, které přísluší bodu MPP se nazývá MPP-napětí, značí se  $U_{MPP}$ . Při tomto napětí dává fotovoltaický modul maximální výkon. V praxi se dosáhne maximálního výkonu blízkého hodnotě MPP, je-li k modulu připojena baterie, jejíž napětí je blízké napětí  $U_{MPP}$  nebo pokud je připojen měnič, který toto napětí automaticky na modulu nastaví. Proud a také výkon fotovoltaického článku klesají v závislosti na množství slunečního osvětlení, a to jak při jeho snížení, tak i při vysokých teplotách, kdy při nárůstu teploty o 25 °C klesá výkon krystalických fotovoltaických článků přibližně o 10 %. Pro srovnání jednotlivých fotovoltaických článků, se sjednotily mezinárodní standardizační podmínky (STC). Výkon MPP solárních fotovoltaických článků se srovnává při intenzitě osvětlení 1000  $W/m^2$  a teplotě modulu 25 °C. V praxi je většinou hodnota slunečního osvětlení nižší a moduly se mohou zahřát až na 60 °C, tak hodnoty MPP se většinou nedosahuje. Proto má hodnota výkonu jednotku  $W_p$  nebo-li „Watt Peak“.[1]



### 1.1.3 Typy fotovoltaických článků

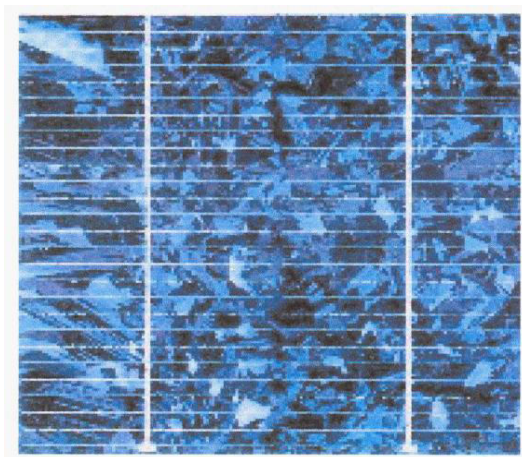
Fotovoltaické články mají za sebou již téměř 50 let vývoje. Za to dobu jich byla vyvinuta celá řada typů a konstrukcí, při využití různých materiálů. Rozlišujeme čtyři generace fotovoltaických článků:

- **První generace** – fotovoltaické články vyráběné z destiček monokrystalického křemíku, ve kterých je vytvořen velkoplošný přechod P-N. Tento typ má dobrou účinnost a dlouhodobou stabilitu výkonu a v současnosti je stále ještě nejpoužívanějším typem. Nevýhodou je jak velká spotřeba drahého křemíku, tak i náročnost výroby.[21]



Obr. 3 - Monokrystalický článek [22]

- **Druhá generace** – zde se projevila snaha o menší spotřebu křemíku, čímž by se zlevnila výroba. Proto se začaly používat tenkovrstvé články. Nejběžnější jsou články z polykystalického, mikrokystalického a amorfního křemíku. Vedle monokrystalických však dosahují nižší účinnosti a menší stability.[21]



Obr.4 - Polykystalický článek [22]

- **Třetí generace** – jedná se o kompozitní, z jednotlivých vrstev složené fotovoltaické články, které jsou schopné efektivně využívat širokou část slunečního spektra. Tato schopnost je dána tím, že každá vrstva dokáže využít světlo v určitém rozsahu vlnových délek, a to záření, které využít nemůže, propustí do hlubších vrstev, kde už je využito.[21]

## 1.2 Větrná energie

### 1.2.1 Historie využití energie větru včera a dnes

Využívání větrné energie není vlastně vůbec nic nového, protože již mnoho let před Kristem se využívala větrná kola k zavlažování půdy. Ve 12. století se začaly v Evropě stavět větrné mlýny k mletí obilí. V následujícím století se větrné mlýny postupně technicky vylepšovaly a zdokonalovaly, což je vidět například na nizozemských větrných mlýnech. Kromě mletí obilí se využívaly také jako vodní čerpadla a pro pohon strojů. Technicky dokonalejší mlýny se otáčely ve větru a mohly se bez rizika odbrzdít. Množství takových mlýnů se v Evropě v 19. století dostalo až k počtu 200 000.[1]

V první polovině 20. století byly většinou větrné mlýny nahrazovány parními a spalovacími motory. Až v době ropné krize koncem 70. let 20. století se začala větrná energie opět využívat. Od té doby stále technicky dokonalejší větrné zařízení pro výrobu elektrické energie představuje skutečnou alternativu pro fosilní paliva.[1]

### 1.2.2 Využití větrné energie

Hlavní vlastností větrné energie je to, že její energetický potenciál značně kolísá. Výkon větru roste s třetí mocninou rychlosti větru, tzn. zvýšení výkonu větru osmkrát, stoupne-li jeho rychlost na dvojnásobek. [1]

Vítr je tak možno si představit jako pohybující se těleso, pro které platí vztah stejný, jako pro mechanickou

$$E = E_K + E_P \quad (1.2)$$

kde:  $E$  ... celková mechanická energie (J),  
 $E_K$  ... kinetická energie (J),  
 $E_P$  ... potenciální energie (J).

Pro kinetickou energii  $E_K$  platí vztah (1.3) a pro potenciální energii platí vztah (1.4)

$$E_K = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (1.3)$$

$$E_P = m \cdot g \cdot h \quad (1.4)$$

Potenciální energii větru však můžeme zanedbat, protože celková mechanická energie větru se skládá jen z energie kinetické, která sama o sobě způsobuje energii na rotoru z energie přenesené rychlosti větru, takže

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (1.5)$$

kde:  $m$  ... hmotnost vzduchu (kg),  
 $v$  ... rychlost vzduchu ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

Pro celkovou hmotnost vzduchu lze napsat

$$m = \rho \cdot V \quad (1.6)$$

kde:  $\rho$  ... hustota vzduchu ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  
 $V$  ... objem vzduchu ( $\text{m}^3$ ).

Objem je možno zapsat pomocí vztahu (1.7) jako součin plochy podstavy a následně nahradit hmotnost vzduchu ve vztahu (1.5) vztahem pro hmotnost (1.8).

$$V = A \cdot s \quad (1.7)$$

$$m = \rho \cdot A \cdot s \quad (1.8)$$

Následně získáme vztah pro energii

$$E = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot s \cdot v^2 \quad (1.9)$$

kde:  $\rho$  ... hustota větru ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ),  
 $A$  ... plocha kterou teče vítr ( $\text{m}^2$ ),  
 $s$  ... dráha větru (m) a  $v$  rychlost větru ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ).

Použijeme-li vztah pro průměrný výkon (1.10), můžeme určit vztah pro výkon protékající jednotkovou plochou (1.11)

$$P = \frac{E}{t} \quad (1.10)$$

$$P_v = \frac{E}{A \cdot t} \quad (1.11)$$

kde:  $P_v$  ... výkon vztažen na jednotkovou plochu ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ )  
 $E$  ... energie větru (J)  
 $A$  ... plocha ( $\text{m}^2$ )  
 $t$  ... čas (s)

dosadíme-li do vztahu (1.11) vztah pro energii větru (1.9) dostáváme rovnici (1.12)

$$P_v = \frac{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot s \cdot v^2}{A \cdot t} \quad (1.12)$$

následnou matematickou úpravou rovnice (1.12) získáme:

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho \cdot s \cdot v^2}{t} \quad (1.13)$$

Protože nepočítáme v hodnotách okamžitých, nýbrž v průměrných, lze pro průměrnou rychlost použít vztah (1.14)

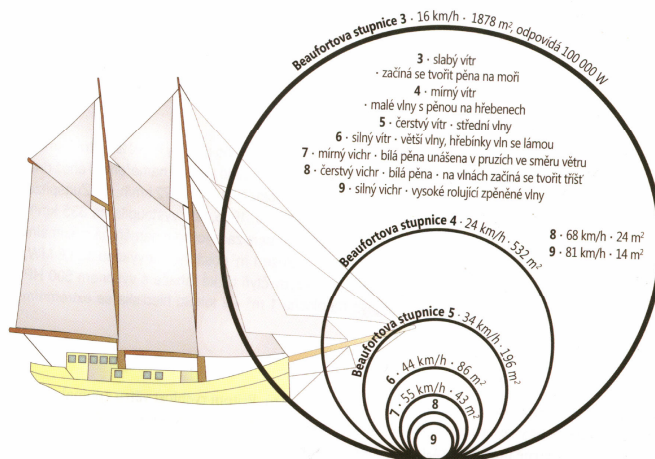
$$v = \frac{s}{t}. \quad (1.14)$$

Dosaďme-li vztah (1.14) do vztahu (1.13) získáme vztah pro výkon, který je vztažený na jednotkovou plochu [10]

$$P_v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (1.15)$$

### 1.2.3 Beaufortova stupnice

Tento pojem se využívá v meteorologii, pro rychlost větru. Beaufortova stupnice je pojmenována podle britského kontraadmirála sira Francise Beauforta, má 12 stupňů a byla vytvořena v roce 1806. Oficiálně byla zavedena v roce 1838.[1]



Obr. 5 – Beaufortova stupnice [1]

### 1.2.4 Betzův výkonnostní koeficient

Moderní systémy využívají pouze část kinetické energie větru, přičemž rychlost větru zpomalují. V podstatě není možné, aby byla využita veškerá energie vzdušného proudění. K tomu by se musel vítr zbrzdít natolik, aby se větrné proudění zastavilo.

Tuto skutečnost zjistil německý fyzik Karl Betz, který v roce 1920 uvedl, že maximální výkon lze získat z větru tehdy, když se jeho původní rychlost zbrzdí na třetinu. V tomto případě je tak možno získat 59,3 % využitelného výkonu.

Betzův výkonnostní koeficient také udává, jaký díl větrné energie může být využit větrnou turbínou a představuje její maximální účinnost. Zdokonalené větrné stroje dokážou za ideálních provozních podmínek využít skoro 50% výkonu větru a přeměnit ho na elektrickou energii. Dosáhnutí této hodnoty zároveň znamená dosáhnout hranice fyzikálních možností. Anglicky se tento výkonnostní koeficient nazývá „power factor“ a označuje se jako  $c_p$ . [1]

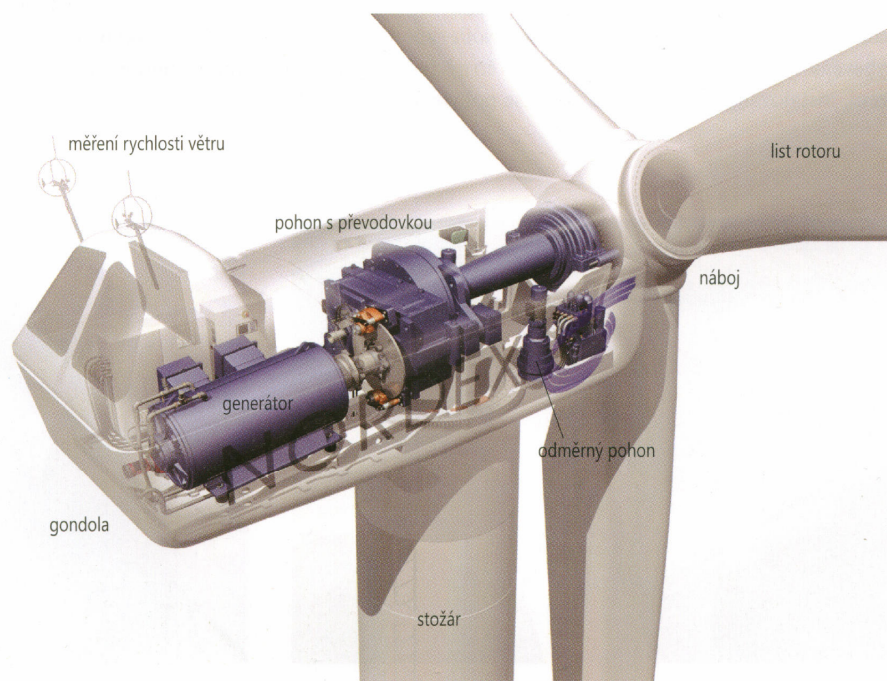
### 1.3 Větrné elektrárny

Větrné elektrárny se vyrábějí ve velkém rozsahu výkonů a používají se pro nejrůznější účely. Jejich rotory se navrhují většinou jako rychloběžné dvoulisté nebo třílisté vrtule, spojené obvykle přes převodovku s generátorem střídavého proudu s měničem frekvence. Pro větší výkonu se vyrábějí větrné elektrárny výhradně s rychloběžnými vrtulami a se synchronními nebo asynchronními generátory. Můžou pracovat buď nezávisle, nebo ve spolupráci s jiným zdrojem elektrické energie, případně přímo do sítě. Rotory větrných elektráren se konstruují s pevnými i natáčivými vrtulovými listy. Rotory s pevnými listy se hůře rozbíhají a dosahují velké účinnosti v celém rozsahu výkonu pouze tehdy, pracují-li s proměnnými otáčkami. Vrtule s natáčivými listy mají při stojícím rotoru natočeny listy regulátorem k menším úhlům náběhu, což znamená, že jsou více odkloněny od roviny vrtule. Po roztočení se listy natácejí více k rovině vrtule, aby bylo dosaženo potřebných otáček. Natáčení listů je vhodné pro regulaci výkonu rotoru při vyšších rychlostech větru.

Nejčastěji používaným generátorem u větrných elektráren je asynchronní generátor. Hlavní výhodou je nižší cena, jednoduchost a spolehlivost, protože nemá pohyblivé kontakty a umožňuje snadné připojení k síti bez nebezpečí vzniku oscilací v okamžiku přifázování, protože otáčky asynchronního generátoru nemusí souhlasit s frekvencí sítě. Má-li asynchronní generátor nadsynchronní otáčky, dodává do sítě elektrický proud, klesnou-li jeho otáčky do podsynchronních, může být elektricky odpojen. Rotor se pak otáčí pomalu bez velkého odporu, dokud se opět nezvýší rychlost větru. Je možno použít generátor i k rozběhu rotoru.

Další možností pro generátor je generátor synchronní. Ten má výhodu v tom, že je schopen si sám zajistit magnetizační proud, ale je dražší než asynchronní. Další nevýhodou je složitější zařízení pro přifázování na síť, které musí zajišťovat i odpojení generátoru při poklesu otáček. [23]

Celková konstrukce větrné elektrárny je betonový stožár, na kterém je umístěna gondola. Uvnitř gondoly je převodovka (není podmínkou) a generátor, dále je vybavena zařízením pro měření rychlosti a směru větru. Posledním prvkem jsou listy vrtule, připojené na rotor.



Obr.6 – Gondola větrné elektrárny [1]

V posledních letech prošly obrovským technickým rozvojem hlavně velké větrné elektrárny. V 80. letech minulého století se typický výkon větrné elektrárny pohyboval kolem 100 kW. Rotory měly průměr méně než 20 m. V roce 2005 někteří výrobci vyvinuli prototyp s výkonem 5 MW a s průměrem rotoru více než 110 m. Dnes již tato zařízení dospěla do sériové výroby. Se vzrůstem rozměrů větrných elektráren roste také jejich výkon, který má však své hranice. S rostoucí velikostí a výkonem rostou také náklady na materiál daného zařízení a na dopravu do určeného místa. [1]



Obr. 7 – Větrná elektrárna [1]

V dnešní době se hlavně v zahraničí začínají stavět větrné parky. Jejich hlavní výhodou je jejich projektování, výstavba a údržba. Nachází se totiž velké množství jednotlivých větrných elektráren blízko sebe. Větrné parky dělíme na tři druhy – offshore, onshore, nearshore.

Offshore je označení pro větrný park, kdy větrné elektrárny stojí v moři, upevněné na dně mimo pobřeží. Onshore jsou větrné parky na pevnině a nearshore jsou větrné parky, které stojí blízko pobřeží. Například německé offshore parky stojí na moři, ukotvené až 50 m pod hladinou a vzdálené od pobřeží 30 až 100 km. Výkonově by měly dosáhnout k 1 GW, cena sahá až k miliardě euro. [1]



Obr. 8 – Onshore park [24]



## **1.4 Energie vody**

Na Zemi je celkem 1,4 miliardy km<sup>3</sup> vody. Z toho je 97,4 % slaná voda moří a pouze 2,6 % je voda sladká. V polárním ledu, v ledovcích a v ledu na hladině moře je uloženo  $\frac{3}{4}$  sladké vody, zbytek představuje podzemní voda a vlhkost půdy. Pouze 0,02 % vody na Zemi se nachází v řekách a jezerech.[1]

Energie vody je po staletí využívána, když jako vodní kolo poháněla mlýny, či sloužila pro pohon dalších strojů a zařízení. Dnes je využívána mimo jiné pro výrobu elektrické energie v průtočných, přečerpávacích elektrárnách, elektrárnách využívajících přílivu a odlivu, atd. Kde se ale bere energie obsažená ve vodě? Ze Slunce.

### **1.4.1 Teplo vody**

Voda získává svou energii ze Slunce, a to v několika formách. Jednou z nich je energie v podobě tepla.

Sluneční světlo je obrovský proud mnoha fotonů, které ze Slunce přenášejí energii. Molekula vody je elektrický dipól, kdy u atomu kyslíku převažují záporné elektrony a u atomů vodíku kladné protony. Sluneční foton je kmitající elektrická síla, která při dopadu rozkmitá molekulu vody. Při této přeměně energie fotonu na pohybovou energii molekuly se uplatňuje elektromagnetická interakce, nebo-li pohlcení (absorpce) záření. A takovýto přeměn slunečního záření na teplo probíhá každou sekundu nesmírně mnoho. Rychlejší pohyb molekul tak znamená větší pohybovou energii, čili vzrůst tepla a teploty vody.[11]

### **1.4.2 Gravitační energie vody**

Gravitační energií rozumíme polohovou energii vody v gravitačním poli Země. Je to energie té vody, která byla vyzvednuta do výšky nad mořskou hladinu. Značná část sluneční energie dopadající na rozsáhlé hladiny oceánů a moří se spotřebuje na zahřátí, vypařování a vynášení vypařených vodních molekul vysoko nad hladinu. Tam se molekuly shlukují do kapiček oblaků. Práce vložená do vyzvednutí vody představuje potenciální energii, která může být přeměněna na energii pohybovou v podobě padajícího deště, řek a potoků.

Této energii využívá vodní elektrárna, protože voda v nádrži má větší gravitační energii, než voda v řece pod přehradou a slouží k pohonu turbíny napojené na generátor vyrábějící elektrickou energii.[11]

### **1.4.3 Pohybová energie vody**

Sluneční energie je do vody uskladněna nejen jako teplo a potenciální (gravitační) energie (v oblacích, přehradních nádržích), ale i jako pohybová energie (ve srážkách, v řekách, vodopádech, oceánech). Jen do řek je nepřetržitě vkládáno asi 9 TW sluneční energie. Pohybovou energii řekám a potokům dodává koloběh vody.[11]

## 1.5 Geotermální energie

Planeta Země má strukturu podobnou cibuli. Skládá se z zemského jádra, zemského pláště a zemské kůry. Pro nás je však při potřebě využití tohoto druhu energie dostupná pouze svrchní vrstva, která dosahuje hloubky 40 km s teplotami v rozmezí 0 - 1000 °C.

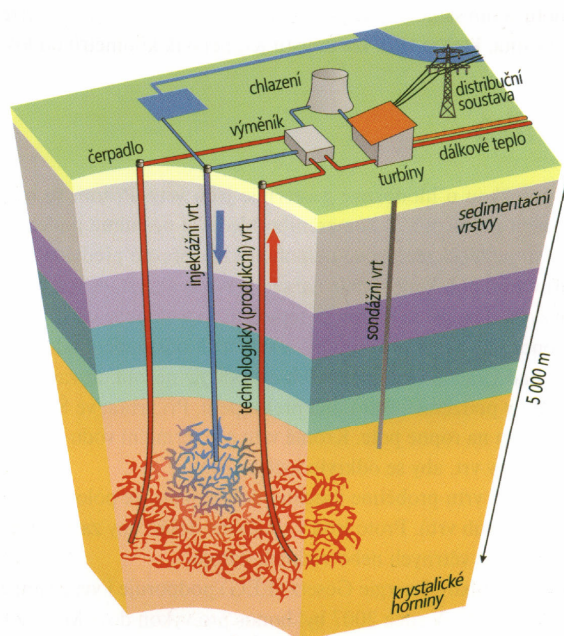
Ve střední Evropě není příliš mnoho optimálních geotermálních zdrojů energie. Ne že by tady vyšší teploty pod zemí nebyly, ale není to tak významné, jako například na Islandu, kde produkce elektrické energie z geotermálních zdrojů tvoří 50 % veškeré tamější výroby elektrické energie. Vůdčí zemí ve střední Evropě je v tomto směru Německo, ale i v České republice je vytipováno asi 60 lokalit pro výrobu elektrické energie z tohoto obnovitelného zdroje

Problémem při využití této energie je hloubka vrtu, které je nutno dosáhnout pro požadovanou teplotu. Průměrný hloubkový gradient je 3 °C na 100 m, což by znamenalo v hloubce 3000 m teplotu 90 °C. Již zmíněný Island takovéto teploty dosáhne už ve 100 m hloubky. Technika takového vrtu je zvládnuta, ale je nákladná. Jen korunkový vrták, osázený diamantovými hlavicemi stojí okolo půl druhého milionu Kč. Nejhlubší realizované vrty se, pro výzkumné účely, prováděly na ruském poloostrově Kola a sahaly až do hloubky 12 km. V Evropě, resp. v Německu dosáhly nejhlubší vrty na 9,1 km. Tyto vrty jsou v dnešní době hranicí technických možností. Pro geotermální využití však „stačí“ i hloubka 5 km.

Při odkrývání zdrojů geotermální energie rozlišujeme :

- 1) zásoby horké páry
- 2) zásoby termální horké vody
- 3) teplo ze suchých hornin (HDR – Hot Dry Rock)

Zásoby horké páry a termální vody lze využít přímo k vytápění a ohřevu vody a také k výrobě elektrické energie. Existují-li zásoby horkých hornin, lze jejich energii využít k ohřevu vody, která se pod tlakem vhání do podzemí jako studená voda, kde se vlivem vysokého tlaku a teplot ohřívá, což lze nadále energeticky využít.[1]



Obr. 9 - Principiální schéma geotermální elektrárny [1]



## 1.6 Energie z chladu

Tento způsob získávání energie je využit v tepelných čerpadlech, která pracují podle druhu (zem-voda, vzduch-voda, voda-voda, atd.) a podle umístění (hluboké vrty, zemní kolektory, venkovní). Princip tepelného čerpadla je znám již od roku 1852, kdy ho objasnil britský profesor fyziky lord Kelvin. Avšak až růst cen ropy a plynu, či problematika životního prostředí znamenají posledních deset let opravdové rozšíření tepelných čerpadel.

### 1.6.1 Tepelné čerpadlo

Tepelné čerpadlo můžeme chápat jako stroj, který obsahuje mechanické nebo elektrické čerpadlo, a to dodává teplo odebráním tepla ze zdroje v okolním prostředí. Toto teplo pak slouží k vytápění nebo k výrobě teplé vody. Tepelné čerpadlo, dá se říct, přečerpává teplo z nižší hladiny do vyšší. K tomu je však zapotřebí nějaký nízkoteplotní zdroj, u kterého platí, čím vyšší teplota tepelného zdroje, tím efektivněji tepelné čerpadlo pracuje. Nízkopotenciální teplo se dá odebrat pomocí kolektoru a vrtu ze země, jak je naznačeno na Obr. 10.

V závislosti na zdrojích tepla rozlišujeme tepelná čerpadla na systémy vzduch / vzduch, vzduch / voda, nemrznoucí směs / voda nebo voda / voda. Před lomítkem je v tomto případě teplonosné medium, za lomítkem je odváděné medium, kterým bývá nejčastěji voda, jen výjimečně vzduch.



Obr.10 – Zobrazení odběru nízkopotenciálního tepla ze země pomocí zemního kolektoru a vrtu [25]

## 1.7 Energie z přírody

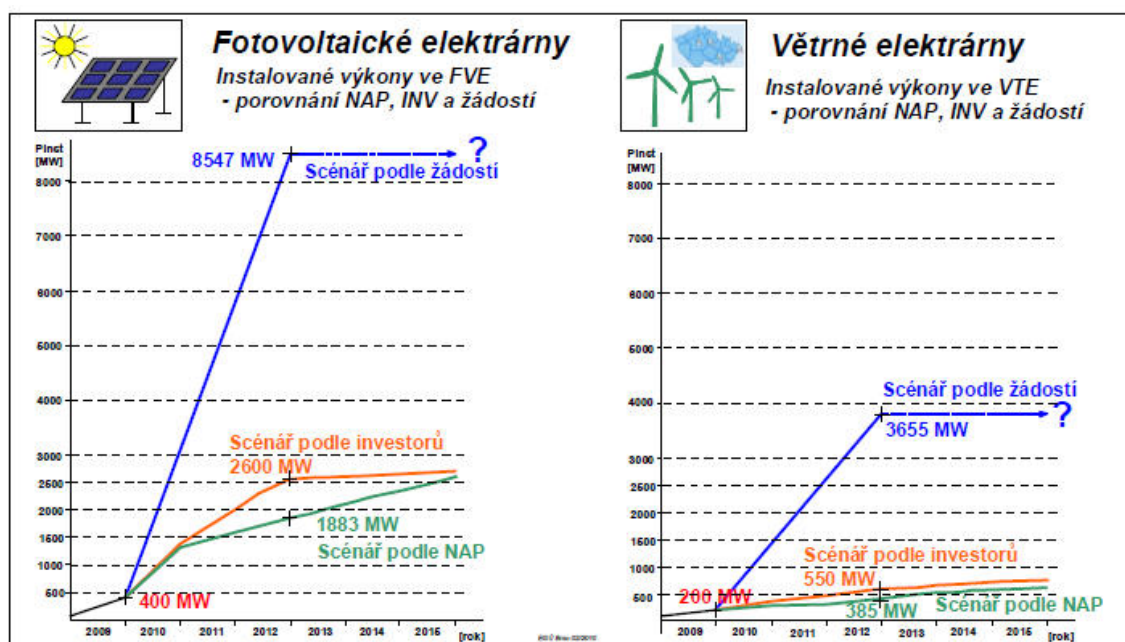
Energie z přírody, nebo-li biomasa. Známá od pravěku, kdy jeskynní člověk poprvé rozdělal oheň, je nejdéle používaný zdroj energie. Až do 18. století taky nejdůležitějším, od té doby je na ústupu před fosilními palivy. Na začátku 21. století se začíná opět o tomto zdroji více mluvit a začínají se zjišťovat možnosti, jak lépe ji využít, než jen spalováním na otevřeném ohni.

Pojem biomasa značí hmotu z organického materiálu, takže zahrnuje živé, či odumřelé organismy a organické produkty látkové výměny. Využití biomasy v jednotlivých částech Země je omezeno, protože jejím zdrojem je Slunce a voda a jako například v severní oblasti není dostatek slunce, tak v teplých oblastech okolo rovníku bývá nedostatek vody.

Lze stanovit také účinnost výroby biomasy. Např. účinnost rostliny se určí tak, že se výhřevnost biomasy dělí množstvím sluneční energie, kterou rostlina získala ve fázi svého růstu. V celosvětovém průměru však tato účinnost dosahuje 0,14 %. Ač malé číslo, tak ve světě stále vzniká nová biomasa, s energetickým obsahem, který odpovídá skoro desetinásobku naší celkové spotřeby primární energie. Člověk však v současnosti využívá pouze 4% nově vzniklé biomasy, přitom možnosti využití biomasy jsou mnohostranné – hlavní potenciál je ve využívání dřeva a dřevních produktů. Dále se také dají využít odpady ze zemědělství a lesního hospodářství, či energetické plodiny. Z biomasy se poté vyrábí suroviny, které se suší, lisují, pakují, kvasí na alkohol – to vše kvůli využití biomasy jako paliva, v podobě pelet, briket, štěpky nebo kulatiny.[1]

## 2 Problematika provozu elektráren využívajících OZE a jejich začlenění do elektrizační soustavy

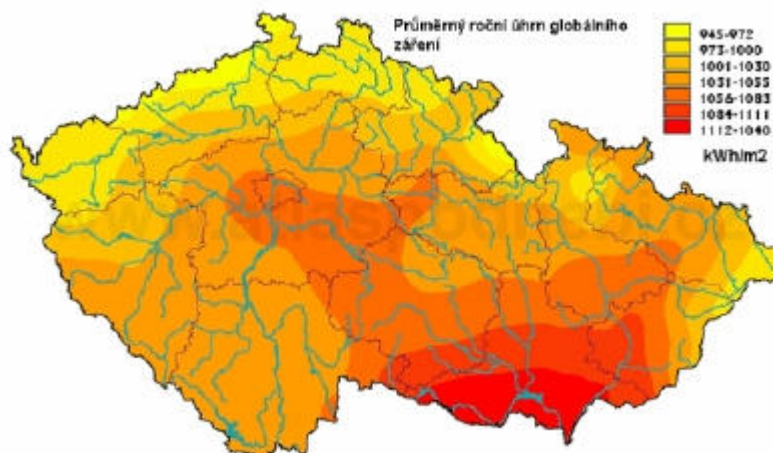
V tomto bodě bych se zaměřil pouze na připojení a problematiku elektráren využívajících OZE pouze na elektrárny typu větrné a solární. Hlavním důvodem je to, že žádosti investorů o připojení do elektrizační soustavy jsou hlavně z těchto dvou obnovitelných zdrojů.



Obr.11 – Žádosti o připojení do ES ČR [7]

## 2.1 Problematika provozu solárních elektráren

Nejspíš jedním z hlavních problémů u solárních elektráren, co se týká ES ČR je intenzita slunečního záření v naší republice, která se, jak znázorňuje Obr.7, pohybuje v rozmezí od 945 kWh/m<sup>2</sup> v severních Čechách do 1139 kWh/m<sup>2</sup> na jižní Moravě.



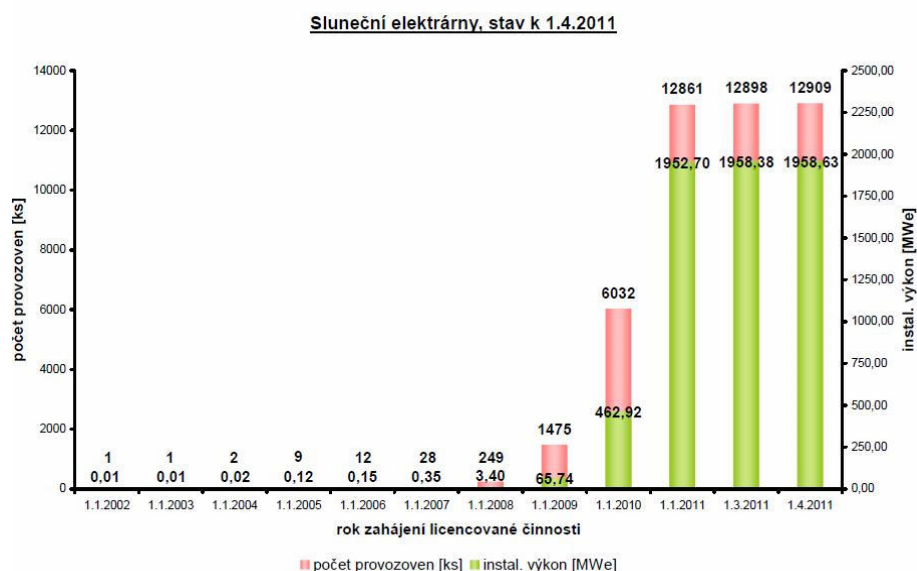
Obr. 12 – Průměrné roční hodnoty slunečního svitu v ČR [1]

V posledních letech je v ČR, co se týče fotovoltaických elektráren (FVE) obrovský boom, který je způsoben vysokými výkupními cenami elektrické energie. Jak již bylo zmíněno, fotovoltaické články prošly technickým vývojem, a jak se zlepšovala jejich kvalita, vstupovali na trh další výrobci a tím snižovali cenu fotovoltaických panelů. Většina států EU na tento pokles ceny reagovala následným snížením výkupní ceny elektrické energie, kdežto ČR ne. Až posledních několik měsíců se řeší, jak tuto cenu snížit.

Datum uvedení do provozu	Výkupní ceny elektřiny dodané do sítě v Kč/MWh	Zelené bonusy v Kč/MWh
Výroba elektřiny využitím slunečního záření pro zdroj s instalovaným výkonem do 30 kW včetně a uvedeným do provozu od 1. ledna 2011 do 31. prosince 2011	7500	6500
Výroba elektřiny využitím slunečního záření pro zdroj s instalovaným výkonem nad 30 kW do 100 kW včetně a uvedeným do provozu od 1. ledna 2011 do 31. prosince 2011	5900	4900
Výroba elektřiny využitím slunečního záření pro zdroj s instalovaným výkonem nad 100 kW a uvedeným do provozu od 1. ledna 2011 do 31. prosince 2011	5500	4500
Výroba elektřiny využitím slunečního záření pro zdroj s instalovaným výkonem do 30 kW včetně a uvedeným do provozu od 1. ledna 2010 do 31. prosince 2010	12500	11500
Výroba elektřiny využitím slunečního záření pro zdroj s instalovaným výkonem nad 30 kW a uvedeným do provozu od 1. ledna 2010 do 31. prosince 2010	12400	11400
Výroba elektřiny využitím slunečního záření pro zdroj s instalovaným výkonem do 30 kW včetně a uvedeným do provozu od 1. ledna 2009 do 31. prosince 2009	13420	12420
Výroba elektřiny využitím slunečního záření pro zdroj s instalovaným výkonem nad 30 kW a uvedeným do provozu od 1. ledna 2009 do 31. prosince 2009	13320	12320
Výroba elektřiny využitím slunečního záření pro zdroj uvedený do provozu od 1. ledna 2008 do 31. prosince 2008	14300	13300
Výroba elektřiny využitím slunečního záření pro zdroj uvedený do provozu od 1. ledna 2006 do 31. prosince 2007	14660	13660
Výroba elektřiny využitím slunečního záření pro zdroj uvedený do provozu před 1. lednem 2006	6990	5990

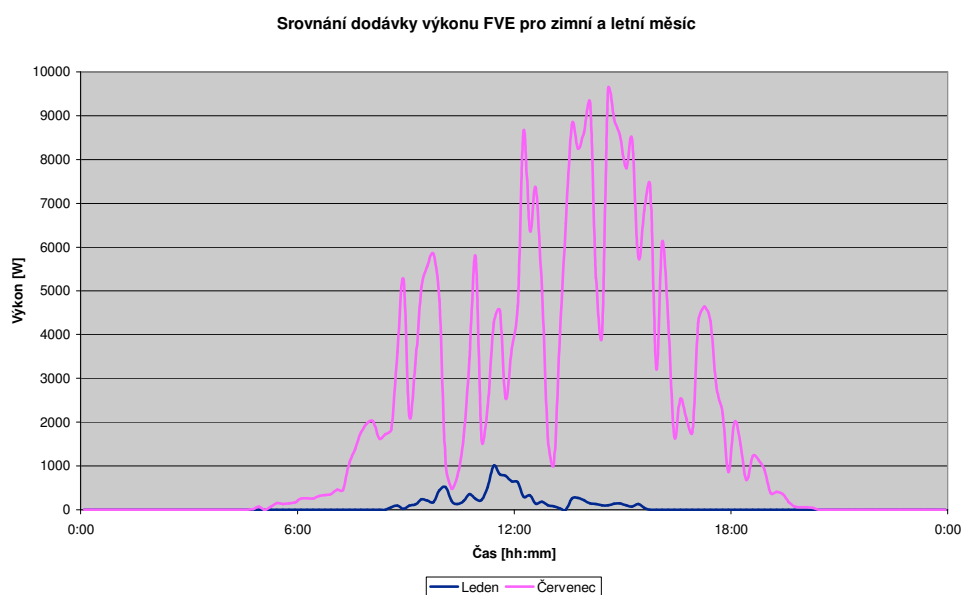
Obr.13 – Jak se vyvíjely výkupní ceny elektrické energie z fotovoltaických elektráren [25]

Od výkupních cen elektrické energie se také odvíjí počet žádostí o připojení fotovoltaické elektrárny do DS, který jen tento rok se zvýšil mnohonásobně oproti minulým létům. Díky těmto vysoko nasazeným sazbám, překračují žádosti o 62 % limit, který nám byl zadán EU. Pro tento rok 2010 bylo množství připojených FVE schopné bez problémů, ale v roce 2012 se již bez některých opatření očekává ohrožení provozu. V síti pak bude nutno mít velký regulovatelný výkon na vyrovnání toků energie, protože obnovitelné zdroje elektrické energie mají dynamicky nepříliš stabilní dodávku elektrické energie. (Obr 15.)



Obr.14 – Počet žádostí o připojení a instalovaný výkon FVE k 1.4.2011 [26]

Solární elektrárny dokáží vyrábět elektrickou energii již při intenzitě záření  $20 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , což je minimum. Maximum však nedosáhne při maximální intenzitě slunečního záření, protože mívají maximální provozní teplotu kolem  $70^\circ \text{C}$ . To značí velkou nestabilitu dodávaného výkonu v různých denních hodinách, která je ještě závislá na ročním období.

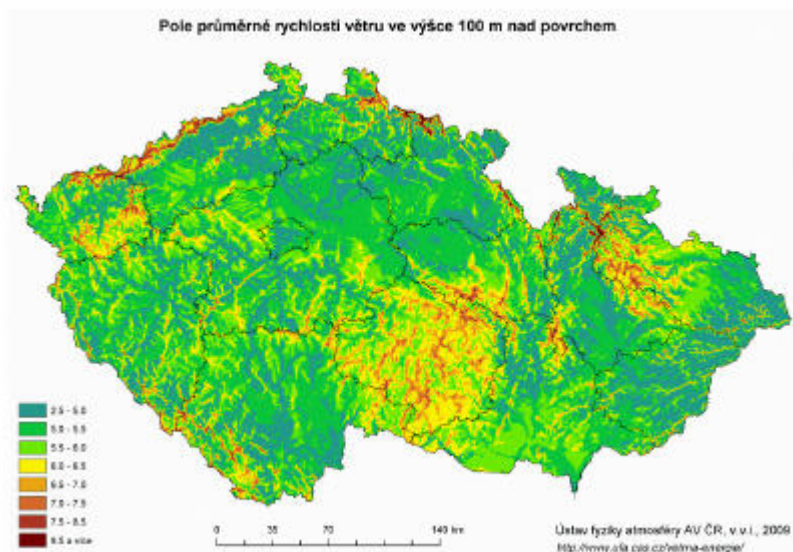


Obr.15 – Srovnání dodávky výkonu FVE [27]



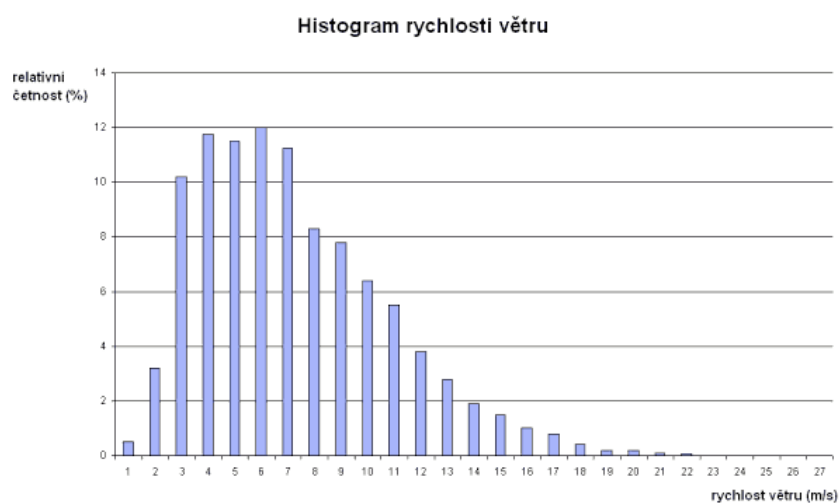
## 2.2 Problematika provozu větrných elektráren

Hlavní výhodou větrné energie je nulová produkce škodlivých emisí, je-li elektrárna provozována jako lokální zdroj, lze se vyhnout i ztrátám pro místní spotřebu a poplatkům za přenos elektrické energie. V České republice je největší problém s intenzitou větru a výběrem správné lokality pro výstavbu větrné elektrárny. Ve vybrané lokalitě by se měla intenzita větru pohybovat minimálně na  $5 \text{ m.s}^{-1}$ , maximálně však  $25 \text{ m.s}^{-1}$ , protože vyšší rychlosti už mohou být nebezpečné a je nutné je pak odstavit. [1]



Obr. 16 – Území vhodná pro větrné elektrárny v ČR [1]

Další problém je zde v relativní četnosti rychlosti větru, která ukazuje, že v našich podmínkách se vyrobí nejvíce energie pro rychlosti větru okolo  $12 \text{ m.s}^{-1}$ . Tento ukazatel má za následek proměnlivost dodávky elektrické energie z větrných elektráren a následné vlivy na síť jsou uvedeny v Kap. 2.2.1.



Obr. 17 - Histogram rychlosti větru [6]

### **2.2.1 Vlivy větrných elektráren na provoz elektrizační soustavy**

Největší problémy s vyvedením elektrického výkonu větrných elektráren vyplývají z faktu, že výkon je velmi závislý na síle a rychlosti větru a proto není možné zajistit konstantní dodávku elektrické energie do místa vyvedení. Větrné elektrárny a farmy větrných elektráren mohou mít následující vlivy na elektrickou síť:

- přetěžování sítí - je třeba dostatečně dimenzované přípojné místo pro vyvedení výkonu
- kolísání napětí - napětí je ovlivněno kompenzací jednotlivých strojů či celé farmy větrných elektráren
- zvyšování zkratových poměrů - připojením větrné elektrárny do přípojného místa se změní zkratové poměry s sítí
- kvalita dodávky - větrné elektrárny jsou vybaveny regulací založenou na výkonové elektronice a jsou tedy často i rušivými zdroji v elektrické síti (flicker, vyšší harmonické, útlum signálu HDO, aj.)

Při začlenění větrné elektrárny do pokrývání diagramu zatížení je dodávka nestabilní a závisí na povětrnostních podmínkách a proto je třeba zajistit dostatečné množství regulačního výkonu pro pokrývání odchylek způsobených větrnými elektrárnami. Tyto vlivy nelze zcela eliminovat, ale lze je alespoň omezit na přijatelnou míru užitím vhodné technologie.

### **2.2.2 Připojení větrné elektrárny do distribuční sítě**

Aby bylo možné větrnou elektrárnu nebo farmu větrných elektráren připojit do distribuční sítě, musí výrobce požádat o připojení, podstoupit přihlašovací řízení s danými zákonnými normami a dále splnit podmínky pro připojení, které jsou dány provozovatelem distribuční sítě (PDS) - Pravidla pro paralelní provoz zdrojů se sítí provozovatele distribučních soustav.

Žádost o připojení musí obsahovat technické specifikace připojovaného výrobního zdroje a dále je třeba znát konfiguraci sítě a místo, kam by měl být nový zdroj připojen. Na základě těchto technických specifikací je třeba provést studii připojitelnosti, kdy se zkoumá, zda-li nový výrobní zdroj na základě pravidel pro paralelní provoz zdrojů může být připojen do distribuční sítě. Při posuzování jsou vyhodnocovány následující parametry:

- zvýšení napětí po připojení,
- zvýšení napětí při spínání,
- flicker (souvisí s kolísáním),
- proudy vyšších harmonických,
- ovlivnění zařízení HDO (hromadné dálkové ovládání). [6]

### **3 Systémy pro akumulaci energie se zaměřením na vodíkové technologie**

Myšlenka vodíkových energetických systémů (tzv. vodíkové hospodářství) se zkoumá od 60. let 20. století. Nejprve se jednalo o využití mimošpičkového výkonu zejména z jaderných elektráren. Teprve v poslední době přibyla i možnost využít přebytný výkon solárních a větrných elektráren.

Vodík je obnovitelnou energií, dá se říci, že je to nevyčerpatelný zdroj energie (při uvažování jeho obsahu ve vodě) a při pohledu do budoucna je považován taky za jeden z nejdůležitějších zdrojů. Tento prvek má vysokou hustotu energie na jednotku hmotnosti, dá se dobře transportovat i skladovat. Spalování vodíku je čistší než spalování fosilních paliv.

Jednou z perspektivních metod je akumulace energie do vodíku vyráběného elektrolýzou vody. Hlavní možností pro využití vodíku jako zdroje energie jsou však palivové články, což jsou galvanické články určené pro přímou přeměnu chemické energie vodíku na elektrickou, reakcí s kyslíkem za vzniku vody. Palivové články se dělí podle druhu použitého elektrolytu na několik typů. Jednotlivé palivové články vykazují napětí jen kolem 1 V, proto jsou v praktickém uspořádání řazeny sériově nebo paralelně do několika vrstev, aby se dosáhlo požadovaných výkonů.[3]

Elektrická energie z obnovitelných zdrojů může být využita pro lokální výrobu vodíku, protože částečně odstraňuje komplikace s regulací energetické přenosové soustavy, při přebytku energie, který mohou obnovitelné zdroje způsobovat. Zde je několik způsobů, jak z ní vodík vyrobit.

#### **3.1 Výroba vodíku**

##### **3.1.1 Výroba vodíku elektrolýzou vody**

Již v roce 1800 vyrobil německý chemik Johann Wilhelm Ritter tímto způsobem poprvé vodík. Elektrolýza rozkládá působením elektrického proudu vodu na vodík a kyslík. Pokud proud pochází z obnovitelných zdrojů, pak lze získávat vodík bez emisí CO<sub>2</sub>. Příkladem je alkalická elektrolýza.[1]

K výrobě 1 kg vodíku elektrolýzou vody je třeba energie  $W_1 = 38$  kWh při účinnosti elektrolýzérů 90% a ke zkapalnění 1 kg vodíku ještě  $W_2 = 10$  kWh.[11]

Při alkalické elektrolýze jsou elektrody ponořeny do vodivého kapalného elektrolytu, což může být např. směs vody s kyselinou sírovou, nebo hydroxidem draselným (KOH). Anoda a katoda přivádějí stejnosměrný proud do elektrolytu, kde se voda rozkládá na vodík a kyslík.[1]

Takovýto proces elektrolýzy probíhá za pokojových teplot a je k němu potřeba pouze elektrická energie. Účinnost se zde pohybuje okolo 80 - 92 %. Při uvažování účinnosti elektrické energie, která je zapotřebí, je však celková účinnost nižší, a to 25 - 35 %.

Konvekční elektrolýza je vhodná tam, kde je levnější výroba elektrické energie, např. z geotermálních zdrojů (Island). K výhodám patří možnost použití různých zdrojů vstupní energie a vysoká čistota elektrolytického vodíku. Nevýhodou jsou vysoké náklady na membránu v elektrolýzáru a vysoké ceny elektrické energie (např. v ČR).[14]

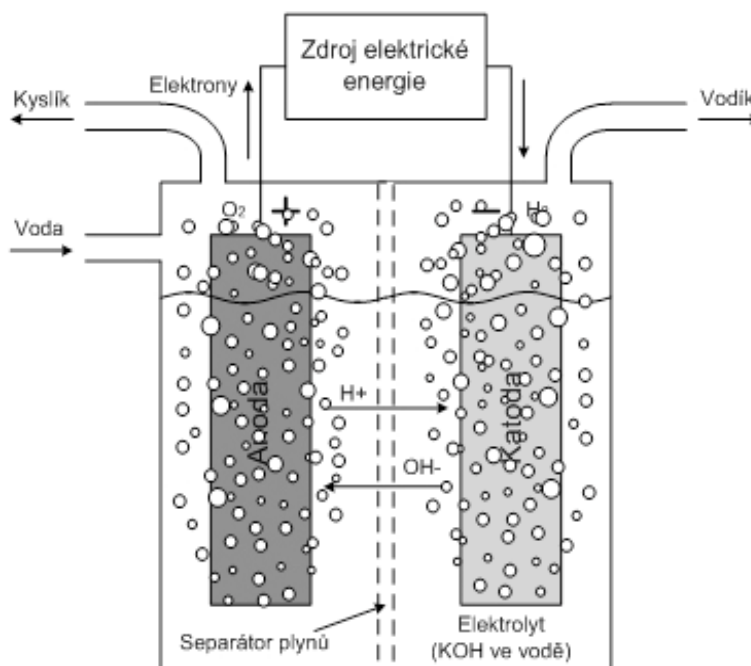
### 3.1.2 Popis elektrolyzéru

Elektrody elektrolyzéru jsou kladné a záporné a jsou ponořeny do elektricky vodivé vody. Vodivosti je dosaženo přidáním vodíkových či hydroxylových iontů (hydroxidů), které jsou nejčastěji ve formě alkalického hydroxidu draselného KOH.

Jako materiál, ze kterého je vyrobena anoda (kladná elektroda), může být použit nikl nebo měď. Její povrch je pokryt oxidy kovů, jako je mangan, wolfram či ruthenium. Kovy anody umožňují na jejím povrchu rychlé párování kyslíku do kyslíkových párů.

Katoda, nebo-li záporná elektroda bývá většinou vyrobena z niklu, potaženého malým množstvím platiny, která funguje jako katalyzátor. Katalyzátor umožňuje rychlé párování atomárního vodíku do vodíkových párů na povrchu elektrody, čímž vzrůstá rychlost produkce vodíku. Bez katalyzátoru by se atomární vodík hromadil na elektrodě a blokoval by průchod elektrického proudu.

Separátor plynu (membrána), je použit pro zabránění vzájemného promísení vodíku a kyslíku při současném umožnění volnému průchodu iontů. Je obvykle vyráběn z materiálů na bázi azbestu majících schopnost ubránit se teplotám vyšším jak 80 °C.[28]



Obr. 18 – Princip elektrolyzéru [28]

Elektrolyzéry mohou být různých druhů, a to podle uspořádání elektrod a druhu elektrolytu. Jádrem tvoří výše zmíněná polopropustná membrána, která je na obou stranách pokryta katalyzátorem. Základní druhy elektrolyzéru jsou:[28]

- Alkalické elektrolyzéry
- PEM elektrolyzéry
- SOFC elektrolyzéry



### 3.1.3 Výroba vodíku vysokoteplotní elektrolýzou

Tento způsob, taktéž nazývaný parní elektrolýza, charakterizuje, že část dodávané energie tvoří energie elektrická a část je přivedena ve formě tepla. Reakce zde probíhá ve vysokoteplotním elektrolýzáru, do kterého vstupuje pára a vodík. Vystupuje z něj obohacená směs, která obsahuje 75 % hmotnosti vodíku a 25 % hmotnosti páry. Z ní je na anodě oddělen iont kyslíku, který prochází skrze membránu. Vodík je pak z páry oddělen v kondenzační jednotce.

Výhodou je zvýšení účinnosti procesu elektrolýzy vody, díky snížené spotřebě elektrické energie a snadnějšímu překonání aktivační bariéry na povrchu elektrody. Spotřeba elektrické energie je snížena právě díky růstu teploty vstupní páry, a i když celková energie, způsobena ohřevem páry, celkově roste, tak se dostáváme až k účinnosti 45 %. Další výhodou je, že do procesu nevstupují jiné chemické látky než  $O_2$ ,  $H_2$  a  $H_2O$ , čímž se odstraní problémy s korozí.[14]

### 3.1.4 Výroba vodíku termochemickými cykly

Termochemické cykly byly studovány již na přelomu 70. a 80. let 20. století, tedy v době ropné krize, kdy se hledaly ekonomické výroby alternativních paliv.

Tímto způsobem se termochemicky štěpí voda a je rozdělena na kyslík a vodík, a to pomocí série chemických reakcí, které jsou podněcovány teplem, popř. teplem a elektrickou energií zároveň. Použité chemické látky jsou v průběhu reakcí recyklovány a vstupují opět zpátky do reakce, takovému cyklu se říká uzavřený.

Základní uzavřené cykly jsou S-I cyklus, hybridní termochemický cyklus a tzv. westinghouse proces.[14]

**S-I cyklus** – nebo-li siřičito-jódový termochemický cyklus, který byl vyvinut v USA v polovině 70.let 20. století a je předním kandidátem levné a účinné výroby vodíku pomocí jaderné energie. Vstupní surovinou je zde opět pouze voda a vysokopotenciální teplo. Výstupní veličinou jsou kyslík, vodík a nízkopotenciální teplo. Všechny suroviny jsou v kapalném stavu a dochází k těmto reakcím:

- 1)  $I_2 + SO_2 + 2H_2O \rightarrow 2HI + H_2SO_4$  ( $120^\circ C$ )
- 2)  $H_2SO_4 \rightarrow SO_2 + H_2O + 1/2O_2$  ( $800 - 1000^\circ C$ )
- 3)  $2HI \rightarrow I_2 + H_2$  ( $300 - 450^\circ C$ )

Oproti elektrolýze má tento způsob vyšší účinnost, 42 – 50 %, protože nedochází ke ztrátám elektrické energie. Nevýhodou však je agresivita kyseliny sírové a jodovodíkové, takže je zapotřebí odolnějších materiálů

**Hybridní termochemický cyklus** – je kombinací termochemického cyklu a elektrolytického štěpení vody. Hybridní cykly se obecně mohou jevit jako nevýhodné, kvůli potřebě elektrické energie a vysokým nákladům na elektrolýzáru, ale na druhou stranu umožňuje chod nízkoteplotních reakcí a snižuje se pak počet chemických kroků.[14]

**Westinghouse proces** – také hybridní cyklus kyseliny sírové. Byl vyvinut společností Westinghouse v roce 1975, dodnes jeho výzkum probíhá. Zde do reakce vstupuje voda a oxid siřičitý a za přispění elektrické energie vzniká vodík a kyselina sírová, která se pak dalšími akcemi rozpadá na vstupní suroviny a kyslík. Probíhá v těchto reakcích:

- 1)  $2\text{H}_2\text{O} + \text{SO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2$  (80° C, elektřina)
- 2)  $\text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{SO}_3$  (450° C)
- 3)  $\text{SO}_3 \rightarrow \text{SO}_2 + 1/2\text{O}_2$  (800° C)

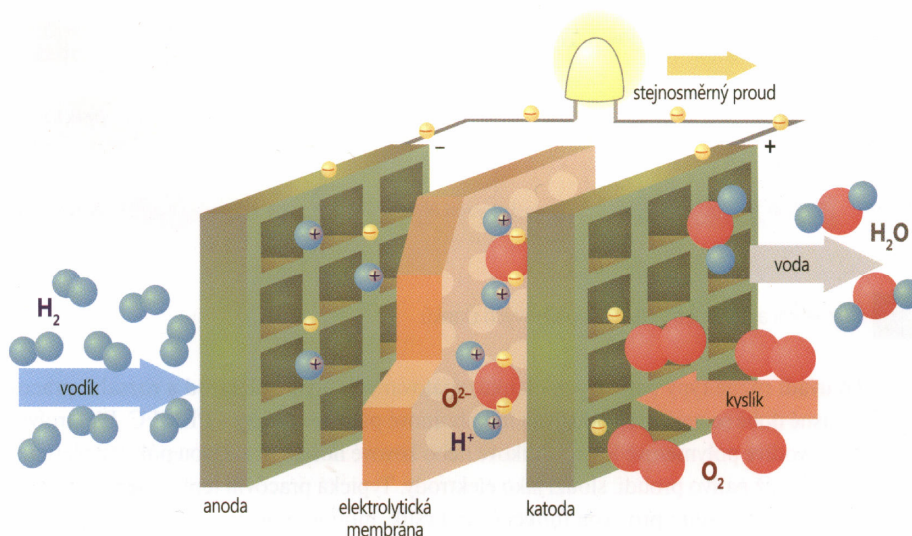
Účinnost tohoto procesu je kolem 40 %. Jeho výhodou je 3 až 4 krát nižší spotřeba elektrické energie než při elektrolytickém štěpení vody. Jde o nejjednodušší proces ze skupiny sírových, ne však nejúčinnější. Mezi nevýhody patří velké korozní vlastnosti, které způsobuje kyselina sírová.[14]

## 3.2 **Výroba elektrické energie pomocí vodíkových technologií**

### 3.2.1 **Palivové články**

První pokusy, které vedly k technice palivového článku, byly prováděny již v roce 1838 německo-švýcarským chemikem Christianem Friedrichem Schonbeinem. Na to navázal v roce 1839 anglický fyzik Sir William Robert Grove, který palivové články sestavil. Dalším vývojem se zabývali vědci Edison a Becquerel. Až v polovině 20. století vývoj pokročil natolik, že mohla NASA přistoupit k dlouhodobější aplikaci. [1]

Název těchto článků je odvozen od skutečnosti, že v nich probíhá tzv. studené spalování paliva za tvorby elektrického proudu. Pro funkci palivových článků musí být splněny dvě základní podmínky - palivo i okysličovadlo jsou kontinuálně a přitom odděleně přiváděny k elektrodám a reakční zplodiny jsou postupně z článku odváděny. Články se tedy pouze vybíjejí a fungují, je-li zajištěn přívod paliva a okysličovadla do článku. [1]



Obr. 19 – Princip fungování palivového článku [1]

Jako palivo lze v článcích použít právě vodík, nebo např. formaldehyd, amoniak, oxid uhelnatý, zemní plyn, metan, metanol, etanol a kyselina mravenčí, oxidačními činidly mohou být buď čistý kyslík, vzduch nebo peroxid vodíku. Je-li palivem vodík, odpadem je voda.

Elektrolytem mohou být vodné roztoky hydroxidu draselného (KOH) nebo kyseliny sírové ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) či fosforečné ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ), dále iontoměničové membrány, roztavené uhličitany a tuhé oxidické keramiky.

Elektrody palivových článků jsou inertní, na nich probíhají příslušné řízené elektrodové reakce. Průběh reakcí se urychluje pomocí katalyzátorů, kterými jsou nejčastěji platina či platinové kovy. [2]

### 3.2.2 Typy palivových článků

Jak již bylo uvedeno, palivové články různých druhů mají názvy odvozené z anglických názvů, pracují v různém rozmezí teplot, s různými elektrolyty, palivem a oxidantem. Rozsah jejich teplot je taktéž různý. Základním rozdělením je rozdělení na přenosné, mobilní, stacionární a speciální články.

**Přenosné palivové články** – jsou to zdroje elektrické energie pro elektronické přístroje, např. notebooky, digitální fotoaparáty, záložní zdroje energie (UPS) pro stolní počítače, atp. Typický jmenovitý výkon je v řádu desítek wattů a většinou se jedná o nízkoteplotní palivové články (PEM FC, DMFC).

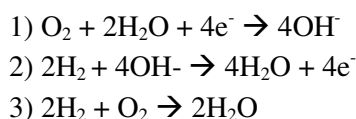
**Mobilní palivové články** – slouží jako zdroje elektrické energie v různých dopravních prostředcích. Vývoj těchto článků je zaměřen zejména na pohonné jednotky pro osobní automobily s výkonem řádově desítky kilowattů, s použitým palivem vodík nebo metanol.

**Stacionární palivové články** - zdroje elektrické a tepelné energie s širokým rozsahem instalovaných výkonů v závislosti na předpokládaném využití a dané specifikaci. Články s rozsahem jednotek kilowatt jsou určeny jako výhradní zdroje energie pro zajištění dodávek elektřiny a tepla do bytů, rodinných domů nebo jako záložní zdroj většího rozsahu. Články s větším rozsahem výkonů se používají jako zdroje energie pro větší celky, jako jsou administrativní budovy.

**Speciální palivové články** – jsou to zařízení určené zejména jako zdroje elektrické energie pro kosmický výzkum, kde se využívají jediné alkalické palivové články (AFC).[13]

### **Konkrétní typy palivových článků jsou AFC, PEFC, PEMFC, DMFC, PAFC, MCFC, SOFC**

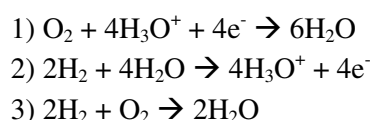
**AFC** – Alkaline Fuel Cells (alkalické palivové články), což jsou nízkoteplotní kyslíko-vodíkové články s alkalickým elektrolytem, který může být tvořen KOH nebo NaOH. Operační teplota se nejčastěji pohybuje kolem 60-90 °C, článek však může pracovat i při pokojové teplotě. Základní elektrodové reakce můžeme psát ve tvaru:



V alkalickém elektrolytu je kinetika kyslíkové redukce podstatně rychlejší než v kyselém prostředí. To spolu s nízkou korozivností umožňuje použití neplatinových katalyzátorů, což může vést k citelnému snížení ceny těchto systémů. Další výhodou je poměrně jednoduchá konstrukce článku. Naproti tomu velkou nevýhodou AFC je citlivost elektrolytu na  $\text{CO}_2$ . Ten v hydroxidech tvoří málo rozpustné

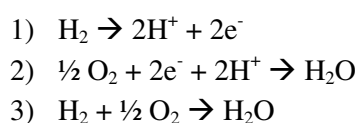
uhličitanů, což vede ke snižování vodivosti elektrolytu a zanášení pórů a tím ke zvyšování ztrát. K zamezení tohoto jevu je nutná velká čistota přiváděných plynů  $H_2$  a  $O_2$ . Účinnost AFC se pohybuje kolem 60 - 80 %.[12]

**PEFC** – Polymer Electrolyte Fuel Cell (palivové články s polymerickým elektrolytem). Jsou to články, které mají jako elektrolyt použit polymerní iontoměničovou membránu. Je to polymer s funkčními skupinami kyselin nebo zásad. Dnes je nejznámější membrána NAFION, která má strukturu odvozenou od Teflonu, na kterou jsou navázány boční řetězce kyseliny sulfonové  $SO_3H^+$ . Ta má vlastnosti velmi silné kyseliny a může uvolňovat ionty  $H^+$ , které jsou v polymeru volně pohyblivé. Probíhají zde tyto elektrodové reakce:

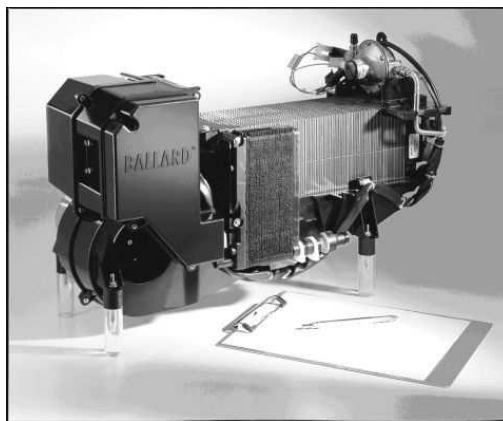


Výhoda pevného nebo polymerního elektrolytu je nezávislost na jeho poloze a proto se tyto články velmi dobře hodí pro mobilní aplikace či pro elektrickou trakci. Odpadají také problémy s vnější korozí, protože jedinou kapalinou je zde voda. Kyselý polymerní membrány jsou však velmi citlivé na ionty obecných kovů, které blokují membránu. Proto je důležité používat platinové katalyzátory. Dalšími nevýhodami jsou vyšší cena a teplotní rozsah, který nesmí přesáhnout  $100^\circ C$ , protože voda se nesmí kvůli hydrataci membrán rychleji odpařovat než vznikat. Účinnost těchto článků se pohybuje kolem 50 – 60 %

**PEMFC** – Proton Exchange Membrane Fuel Cell (membránové palivové články), jsou dnes nejpoužívanější palivové články. Elektrolyt sestává z iontové vodivé polymerové fólie. Uhlíkové nebo kovové nosiče, které jsou pokryté platinou jako katalyzátorem a jimiž palivo proudí, slouží jako elektrody. Typická pracovní teplota se pohybuje kolem  $80^\circ C$ . Tyto články nevyžadují pro svou funkci kyslík, mohou pracovat pouze s obyčejným vzduchem. V palivových článcích typu PEM spolu reagují vodík a kyslík. Reakce probíhající v článku:



Proton  $H^+$  prochází elektrolytem od anody ke katodě vlivem vzájemné přitažlivosti mezi vodíkem a kyslíkem, zatímco elektrony jsou nuceny k oběhu od anody ke katodě přes vnější elektrický obvod. PEM FC články produkují vodu, která se hromadí na katodě. Tato produktová voda musí být plynule odváděna z článku, aby byla zajištěna kvalita dalšího průběhu reakce. Tento typ článku se také používá na VŠB-TUO. Konkrétně se jedná nízkoteplotní palivový článek typu NEXA Power Modul o výkonu 1200 W firmy Ballard s výstupním napětím 26 až 43 V podle zatížení. [5]



Obr. 20 – Palivový článek NEXA Power Modul fy Ballard [5]

**DMFC** – Direct Methanol Fuel Cell (methanolový palivový článek), je vylepšenou verzí PEFC a je také vybaven membránou ze syntetického materiálu jakožto elektrolytu. Jako palivo využívá kapalný (resp. plyný) methanol, a to v závislosti na typu aplikace. K platinovému katalyzátoru se na anodě přidává ruthenium, které zabraňuje otravě platiny meziprodukty vzniklými během reakce. Tyto meziprodukty jsou skupin COH nebo CO. Ruthenium zde dokončuje jejich odštěpení jako CO<sub>2</sub>. Elektrodové reakce jsou:

- 1)  $3/2 \text{ O}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^- \rightarrow 3\text{H}_2\text{O}$
- 2)  $\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + 6\text{H}^+ + 6\text{e}^-$
- 3)  $\text{CH}_3\text{OH} + 3/2 \text{ O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$

Fyzikální vlastnosti vody a methanolu vedou k jeho unikání z anody přes membránu ke katodě, kde se spaluje bez užitku – tomu se říká methanol cross-over. Tento jev způsobuje smíšený potenciál na katodě a tím snižuje napětí článku. Dalším projevem tohoto jevu je spolu s mnohem pomalejší oxidací methanolu než vodíku nižší výkon i účinnost než článek PEFC. Výhodou je snadné ukládání paliva s vysokou hustotou energie a jednoduchá konstrukce samotného článku

Výhodou je snadné ukládání paliva s vysokou hustotou energie a jednoduchá konstrukce článku. Toho se využívá v přenosných aplikacích.

**PAFC** – (Phosphoric Acid Fuel Cells), což je středně-teplotní systém H<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>. Elektrolytem je koncentrovaná kyselina fosforečná a pracovní teplota je 160 – 220°C. Při nižších teplotách ztrácí kyselina fosforečná iontovou vodivost a tuhne v krystalické podobě. Mezní nejnižší teplota nesmí u těchto článků klesnout pod 45°C. Na obou elektrodách musejí být platinové katalyzátory a jako palivo je použit vodík.

Mezi výhody těchto článků je např. odstranění problému s absorpcí CO<sub>2</sub> a koncentrovaná kyselina fosforečná brání korozi některých kovů. Je cenově přijatelný, proto se může využívat v méně obydlených oblastech vzdálených od elektrovedné sítě.

Jako největší nevýhody lze uvést pomalý start článku, protože je nutno jej před uvedením do provozu zahřát na pracovní teplotu. Nehodí se proto k mobilním nebo trakčním aplikacím.

**MCFC** – Molten Carbonate Fuel Cell, patřící do skupiny vysokoteplotních palivových článků, pracujících v rozsahu teplot 600 – 700°C. Jako elektrolyt je použita roztavená směs alkalických uhličitů. Zpravidla se jedná o směs uhličitů lithia, draslíku a sodíku, která je umístěna v tuhé porézní keramické matici. Při pracovní teplotě článku tvoří směs uhličitů vysoce vodivou taveninu, ve které je uhličitovým aniontem  $\text{CO}_3^{2-}$  umožněna vodivost. Spolu s kyslíkem je pro vytvoření aniontu  $\text{CO}_3^{2-}$  nutno přivádět na katodu oxid uhličitý  $\text{CO}_2$ . Jako palivo lze použít vodík nebo oxid uhelnatý  $\text{CO}$ , v praxi se využívá směs obou plynů. Elektrodové reakce při použití obou plynů jako paliva pak jsou následující :

- 1)  $\text{H}_2 + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$
- 2)  $\text{H}_2 + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{e}^-$
- 3)  $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \text{CO}_2$
- 4)  $\frac{1}{2} \text{O}_2 + \text{CO}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow \text{CO}_3^{2-}$

Reakce probíhají velice rychle, proto je na elektrodách možné používat neplatinové katalyzátory. Anoda je tvořena různými typy slitin na bázi Ni-Cr nebo Ni-Cr-Al, katoda je nejčastěji tvořena NiO, do kterého je přidáno lithium. NiO je však rozpustný v tavenině elektrolytu a následně vzniklé ionty Ni mohou přecházet k anodě, kde se stávají opět tuhým niklem a mohou způsobit až zkratování článku, což patří mezi největší nevýhody. S tímto článkem je stejný problém jako s předchozím, a to pomalý start z důvodu nutnosti zahřátí na provozní teplotu.

Výhodou tohoto článku je již zmíněná rychlost reakce a díky vysoké teplotě má také možnost přímé konverze zemního plynu či jiných druhů uhlíkatých paliv. [12]

**SOFC** – Solid Oxid Fuel Cell nebo-li palivový článek s tuhými oxidy. Patří mezi články vysokoteplotní, pracovní teplota je v rozmezí 800-1000 °C. Jako elektrolyt je použit iontově vodivý keramický materiál, např.  $\text{ZrO}_2$  stabilizovaný oxidy yttria  $\text{Y}_2\text{O}_3$ . Ten se v rozsahu pracovních teplot stává vodivým pro ionty kyslíku, kterým umožňuje transport od katody k anodě. Jako palivo se používá vodík nebo oxid uhelnatý. Elektrodové reakce pak jsou :

- 1)  $2\text{H}_2 + 2\text{O}^{2-} \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + 4\text{e}^-$
- 2)  $\text{O}_2 + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{O}^{2-}$

Nevýhodou může být keramický materiál, který kvůli opakovaným změnám teploty může praskat. Ostatní nevýhody jsou stejné jako u předchozích vysokoteplotních typů. Výhodou článku je, že nevyvolává korozi, eliminuje problémy s kapalným elektrolytem a neklade požadavky na tvar článku.[12]

### 3.3 Přečerpávací vodní elektrárna

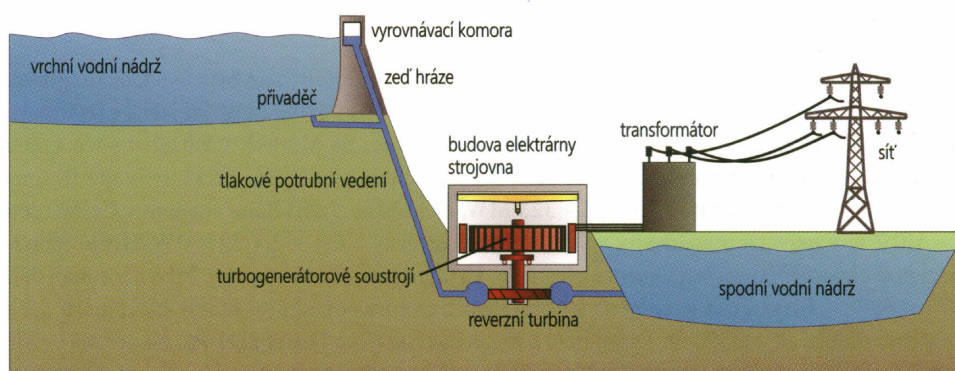
Tento druh vodní elektrárny slouží hlavně k akumulaci elektrické energie a to tak, že při nedostatku energie je schopna ji dodat a při přebytku energie je schopna ji využít. Pro vybudování takovéto elektrárny je potřeba vhodných geografických podmínek, protože je zapotřebí dvě vodní nádrže, každou v jiné nadmořské výšce a jejich spádový rozdíl musí být co možná největší.

Při potřebě elektrické energie přitéká z horní přehrady do spodní přiváděcím potrubím k turbíně. Ta odebírá energii vodě a předává ji generátoru. Naopak při přebytku elektrické energie přechází elektrárna do reverzního režimu. Elektrický stroj pak pracuje jako elektromotor, který odebírá ze sítě nadbytečnou energii a pohání turbínu, která v tomto případě pracuje jako čerpadlo a dodává vodu do horní nádrže.

Přečerpávací elektrárny dosahují účinnosti 70-80 %. Na 70 % elektrické energie, která je zapotřebí pro přečerpání vody, se vrátí provozem generátoru. Tyto elektrárny jsou ekonomicky výhodné, protože odebírají proud v době, kdy je ho dostatek, takže je levnější a dodávají v době, kdy je jeho cena vyšší.

V České republice je největší přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé Stráně, která se nachází na Moravě v obci Loučná nad Desnou, v okrese Šumperk. Má reverzní vodní turbínu o výkonu 325 MW, největší v Evropě, spád 510,7 m a její instalovaný výkon je 2 x 325 MW. Tato elektrárna má pro elektrickou síť tři významy, a to statický, dynamický a kompenzační. Statický význam již byl zmíněn, buď energii dodává nebo odebírá, dynamický význam znamená, že slouží jako rezerva výkonu a kompenzační, že dokáže regulovat napětí v soustavě. [1]

Velkou předností těchto elektráren je rychlost jejich přifázování do soustavy, v případě nedostatku elektrické energie, která se pohybuje řádově v jednotkách minut na plný výkon.



Obr. 21 - Princip přečerpávací vodní elektrárny [1]

### 3.4 Elektrochemické akumulátory

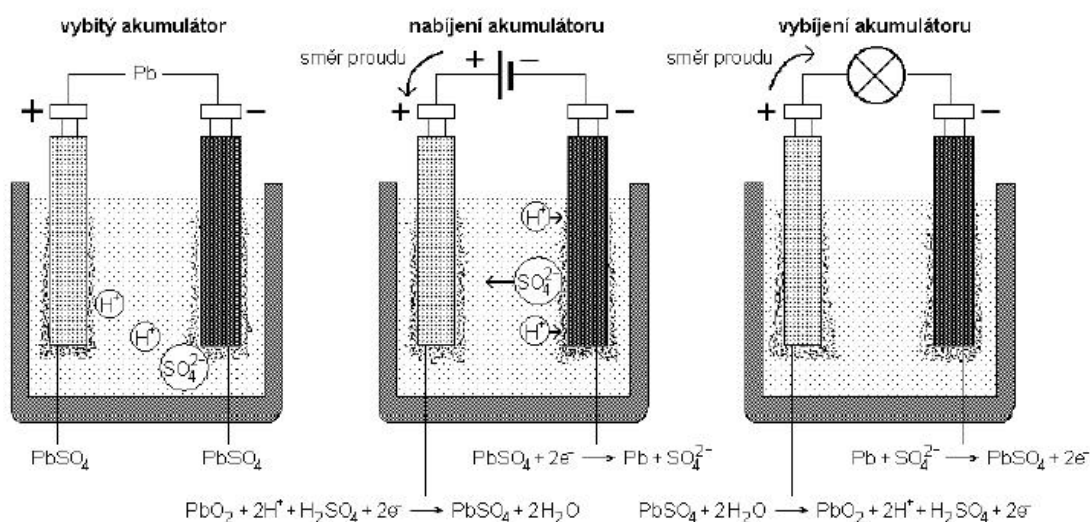
V dnešní době je to obecně asi nejznámější způsob akumulace elektrické energie, s kterým se setkal snad každý z nás. Jedná se o elektrochemický zdroj, ve kterém se přímou cestou mění chemická energie aktivních materiálů v energii elektrickou. Při vybíjení zdroje tak vzniká energie v podobě stejnosměrného proudu. Jelikož jde o přeměnu přímou, je její účinnost velmi vysoká.

Mezi základní typy elektrochemických akumulátorů patří olověné akumulátory, alkalické akumulátory a další druhy, jako např. NiMH nebo NiZn akumulátory.[2]

#### 3.4.1 Olověné akumulátory

Je to nejpoužívanější sekundární elektrochemický zdroj proudu. Vyrábějí se v kapacitách řádově od 1 do 10000 A.h. Nejpoužívanější jsou z důvodu dobře zvládnuté technologie, nízké pořizovací ceně (závislé na ceně olova), provozní spolehlivosti, dobré účinnosti i dostatečného výkonu. Elektrolytem je zde vodou zředěná kyselina sírová, která disociuje na síranové ionty se záporným elektrickým nábojem a vodíkové ionty s kladným elektrickým nábojem. Do elektrolytu jsou ponořeny dvě elektrody, záporná a kladná, kdy při vybíjení je záporná elektroda katodou a při nabíjení je záporná elektroda anodou. Záporná elektroda je tvořena porézním olovem a kladná elektroda je z oxidu olovičitého  $PbO_2$ . [2]

Nevýhodou těchto akumulátorů je jejich krátká životnost a s ní spojené náklady na údržbu a likvidaci, závislost výkonu a životnosti na teplotě okolního prostředí. Schopnost baterie dodat výkon je omezena jejím vnitřním odporem, který se zvyšuje se stářím akumulátoru. Podobně je omezen i nabíjecí proud, z čehož vyplývá delší doba nabíjení. [15]



Obr. 22 – Schéma olověného akumulátoru [16]



### 3.4.2 Alkalické akumulátory

Společným znakem těchto akumulátorů je použití elektrolytu, kterým je vodný roztok hydroxidu alkalického kovu, nejčastěji hydroxidu draselného KOH. Podle použití aktivních hmot kladných a záporných elektrod je dělíme na:

- |                               |                                |
|-------------------------------|--------------------------------|
| 1) nikl-kadmiové (Ni-Cd)      | 5) stříbro-zinkové (Ag-Zn)     |
| 2) nikl-železné (Ni-Fe)       | 5) stříbro-kadmiové (Ag-Cd)    |
| 3) nikl metahydridové (Ni-Mh) | 6) lithium-iontové (Li-ion)    |
| 4) nikl-zinkové (Ni-Zn)       | 7) lithium-polymerové (Li-pol) |

Nikl-kadmiové akumulátory – v dnešní době nejrozšířenější alkalické akumulátory. Mají několik typů konstrukčních uspořádání, které se navzájem liší optimální využitelností vybíjecích proudů a velikostí zkratových proudů. Jsou to typy L, M, H, X. Světová produkce Ni-Cd akumulátoru dosahuje pouze 1/10 výroby olověných baterií a oproti nim mají řadu nevýhod. Jsou dražší, mají nižší napětí článků, menší energetickou účinnost a větší počáteční samovybití. Mezi jejich výhody můžeme zařadit delší životnost, schopnost rychlého nabíjení, větší odolnost proti opotřebení, možnost dlouhodobého skladování bez dobíjení.

Nikl-metahydriové – (Ni-Mh), jehož hlavními složkami jsou kladná elektroda, která je ze sloučenin na bázi niklu, záporná elektroda, která je ze slitiny pohlcující vodík a elektrolyt, kterým je roztok hydroxidu. Mají přibližně třikrát větší objemovou koncentraci než Ni-Cd akumulátory, takže kolem 300 Wh/dm<sup>3</sup>. Jejich cena je však několika násobně vyšší než u olověných akumulátorů pro stejné výkony.



Obr. 23 – Ni-Mh akumulátor [17]

Lithium-iontové – běžně používáno ve spotřební elektronice. Kvůli vysoké hustotě energie vzhledem k objemu se hodí pro přenosná zařízení. Anoda je vyrobena z uhlíku, katoda je oxid kovu a elektrolytem je lithiová sůl v organickém rozpouštědle. Hlavní výhody jsou v možnosti různého tvarování baterií, má třikrát vyšší hustotu energie než Ni-Mh, téměř žádné samovybití, vysoké nominální napětí 3,7 V, dlouhou životnost, která dosahuje až 2000 nabíjecích cyklů. Nevýhodou může být cena, která je vyšší než Ni-Mh, nebezpečí výbuchu, ztráta maximální kapacity stárnutím baterie, vadí jí úplné vybití. Dostane-li se pod 2,8 V, je těžké ji znovu nastartovat.

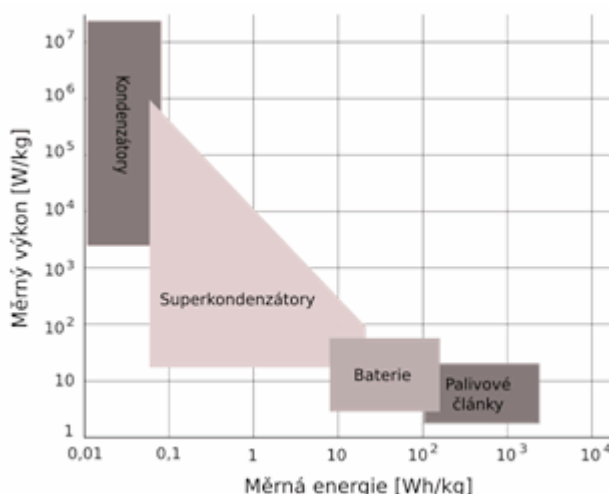
## Setrvačnick

Je to točivý stroj, který dokáže při výpadku sítě po určitou dobu (do 10 s) dodávat potřebný výkon. Je uložen ve skříni, jeho hmotnost se pohybuje ve stovkách kg a rotuje rychlostí 7700 otáček za minutu. Z obalu, ve kterém je setrvačnick uložen se odsává vzduch vakuovou pumpou, aby měl setrvačnick co nejmenší odpor. Aby nedocházelo k opotřebování nosné hřídele, tak je umístěna ve speciálních keramických ložiscích, kterým se však dotýká jen minimálně. Celé tělo setrvačnicku je totiž na elektromagnetickém polštáři. Na území celé Evropy se dosud prodalo přes 100 kusů, dva z nich jsou také v České republice. Výkonově dokážou dodat až 700 kW [18]

Srovnáme-li se setrvačnickem olovený akumulátor při stejné potřebě výkonu, tak olovená akumulátor by byl několikanásobně těžší a asi pětikrát větší než setrvačnick. Ekologicky je na tom také mnohem lépe setrvačnick, protože nepotřebuje tolik olova pro svůj chod a je spolehlivější. Naopak pro akumulátory vyznívá lepe doba zálohy a cena.[18]

### 3.5 Superkondenzátor

Jsou to elektrotechnické součástky schopné akumulovat, udržet a vydat velké množství elektrické energie. Prodávané superkondenzátory mají kapacitu až několik tisíc faradů a nabíjecí a vybíjecí proud v rozmezí jednotek až stovek ampér. Svými energetickými vlastnostmi dokážou vyplnit místo mezi bateriemi a klasickými kondenzátory.[19]



Obr.24 - Energetická bilance superkondenzátorů [19]

Superkondenzátory se využívají tam, kde je potřeba dodat a přijmout velké množství energie ve velmi krátkém čase. V dnešní době se často mluví o jejich využití v automobilovém průmyslu, kdy pro start automobilu je potřeba větších výkonů. Energií by superkondenzátory získávaly rekuperací při brzdění.[19]

Mezi nevýhody patří množství energie uložené na jednotku váhy, které je menší než u elektrochemických akumulátorů.

### 3.6 CAES

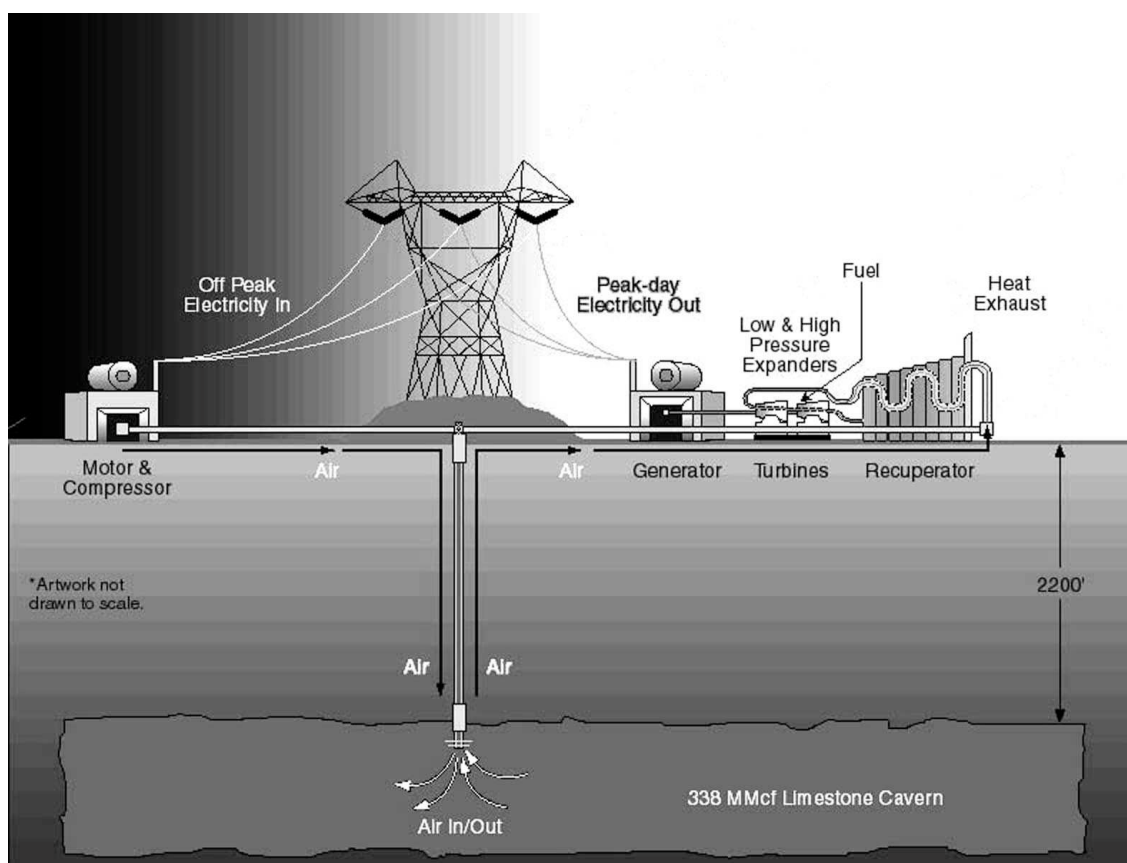
Celý název této technologie je Compressed Air Energy Storage, nebo-li uložení energie do stlačeného vzduchu. Hlavním principem je tedy stlačování vzduchu, za pomoci kompresorů a jeho následné vhánění do podzemí, například do solných jeskyní nebo jiných uzavřených prostor. Způsobů stlačování vzduchu je několik – adiabatické, diabatické a izotermické.[20]

Komprese vzduchu se provádí pomocí elektricky poháněných turbokompresorů a může být rozšířena i o turboexpandéry nebo letecké motory, které jsou napájeny ze sítě.

Při potřebě elektrické energie je stlačený vzduch vpuštěn do turbíny, která začne roztáčet generátor a ten začne dodávat do sítě potřebnou hodnotu energie.

Tento způsob skladování elektrické energie je možno použít pro uchování velkého množství energie, podobně jako přečerpávací elektrárny, protože skladovací kapacity systému CAES jsou 50-300 MW. Doba uskladnění je více než jeden rok a doba náběhu, při potřebě, je od 9 do 12 minut a plný výkon je možno do sítě dodávat po dobu až tří hodin. Hlavní nevýhodou je potřeba velkých podzemních prostor. Účinnost tohoto procesu je kolem 45%.[21]

Tento systém je již instalován ve městech jako je Paříž, Buenos Aires, Drážďany, Birmingham, kdy např. v Paříži bylo instalováno 2,2 MW v 50 km vzduchovém potrubí.

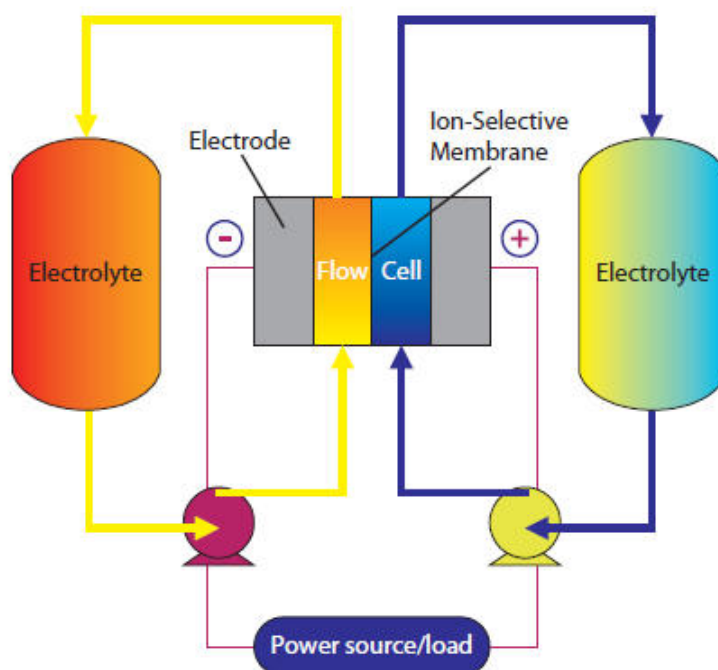


Obr. 25 – Princip CAES [20]

### 3.7 VRB

Zkratka VRB značí Vanad Redoxové Baterie, což je zařízení schopné dlouhodobě uchovávat a opětovně uvolňovat elektrickou energii. Vhodné využití je pro stacionární stanice, jakými jsou např. větrné elektrárny.

Systém funguje na principu redukčně oxidačního reverzibilního článku, ve kterém dochází k přeměně elektrické energie na energii chemickou, vázanou v elektrolytu. K tomu je využito schopnosti prvku vanad, který se může vyskytovat ve více valenčních uspořádáních. Elektrolyty cirkulují ve dvou okruzích oddělených ve vlastním článku iontoměničovou membránou (PEM). V článku se jedna forma elektrolytu elektrochemicky oxiduje a druhá redukuje působením elektrického proudu přiváděného nebo odváděného elektrodami do vnějšího elektrického obvodu.[29]



Obr. 26 – Princip VRB [30]

Princip funkce VRB je podobný funkci palivového článku, ale hlavní výhodou je jeho reverzibilita, což značí, že v tomtéž elektrochemickém měniči může probíhat jak nabíjení tak vybíjení. Rovnovážné napětí plně nabitého článku VRB při provozní teplotě 25 °C je 1,35 V a podle stupně nabití se toto napětí mění až u úplně vybitého článku klesne na hodnotu 1V.

Přechod mezi režimy nabíjení a vybíjení probíhá téměř okamžitě (ms), v závislosti na polaritě rozdílu okamžitého rovnovážného napětí a napětí připojeného vnějšího elektrického obvodu. Akumulační kapacita je dána množstvím elektrolytu v zásobnících a její maximální hodnota je 15 až 25 kWh.m<sup>-3</sup>. Měrná hmotnost článku je 6,5 až 10 kg.kW<sup>-1</sup>.

Akumulátor VRB se řadí k nejvhodnějším zařízením pro akumulaci elektrické energie pro krátkodobé a střednědobé kolísání výkonu u větrných a fotovoltaických elektráren, což výrazně zvýší kvalitu dodávané elektrické energie z těchto zdrojů. Velkými VRB zařízeními lze realizovat akumulační kapacity řádově v hodnotách 100-vky MW. [29]

### 3.8 Ostrovní režim

V dnešní době se ve smyslu využití vodíkových technologií zkouší využití ostrovních režimů, kdy je elektrická energie primárně vyráběna z obnovitelných zdrojů energie a při nedostatku této energie se využívá k výrobě elektrické energie vodík, který se vyrábí při přebytku elektrické energie, protože dodávka z obnovitelných zdrojů často překračuje aktuální požadavky odběratelů. Tento způsob je vhodný v odlehlých oblastech, kde se často využívají k výrobě elektrické energie spalovací naftové motory, které znečišťují ovzduší. Jeden takový systém je provozován v Norsku na ostrově Utsira, což je zkratka pro Utility Systems In Remote Areas.

V letech 2003/2004 norská energetická společnost Norsk Hydro společně s německým výrobcem větrných turbín motorů Enercon, vybudovali síť vzduch/vodík na ostrově Utsira, v Norsku. Oblast produkuje vodík pomocí elektrolyzérů v době, kdy je přebytek elektrické energie z větrných elektráren a následně ji dodává do domácností prostřednictvím palivových článků a spalovacích motorů, když je slabý vítr nebo když větrné elektrárny stojí. Utsira je světově prvním, rozměrově větším, samostatným zkušebním zařízením pro výrobu elektrické energie pomocí vodíku v době, kdy není dostupná energie z obnovitelného zdroje (větru).

Složení takového ostrovního režimu je následující:

Zařízení	Technické parametry
Větrné turbíny	2 x 600 kW
Baterie	35 kWh
Setrvačnick	5 kWh, 200 kW <sub>max</sub>
Synchronní stroj	100 kVA
Elektrolyzér	10 m <sup>3</sup> /h, 48 kW
Zásobníky vodíku	10 m <sup>3</sup> /h při tlaku 200 bar, 2400 m <sup>3</sup>
Vodíkový spalovací motor	55 kW
Palivové články	10 kW

Tab. 1 – Parametry ostrovního režimu Utsira [31]

Elektrolyzér je typu PEM, od firmy Norsk Hydro a jeho úkolem je vyrábět vodík při přebytku elektrické energie. Vyrobený vodík z tohoto elektrolyzérů je přiveden do kompresoru a následně je jeho tlak zvýšen na 200 barů, aby mohl být uchován v zásobníku o objemu 12 m<sup>3</sup>, což je množství vodíku, které pokryje spotřebu domácností na 2-3 dny bez přispění větru. V případě potřeby je vodík spotřebováván v palivových článcích a ve vodíkové spalovacím motoru. Setrvačnick a synchronní stroj slouží ke stabilizaci sítě a baterie poskytují pouze nouzovou pomoc.

Na ostrově Utsira je průměrná roční rychlost větru 10 m/s. Spotřeba elektrické energie pro deset domácností je cca 200 MWh ročně. Elektrolyzér a vodíkový spalovací motor jsou v provozu přibližně 1000-2000 hodin ročně, s počtem startů 100 za rok. Celkový počet domácností na tomto norském ostrově je 219, s roční dodávkou 3,5 GWh ročně.

Za dobu provozu se nestala žádná nehoda, stabilita napětí je velmi dobrá, soudě podle množství stížností obyvatel, kterých není příliš.[30]



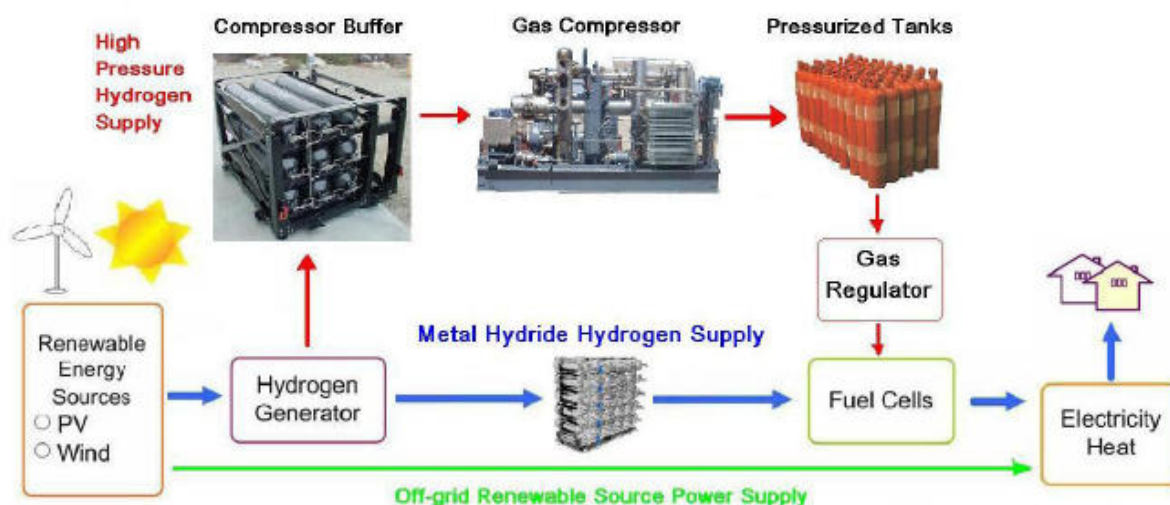
Obr.27 – Provedení systému vítr/vodík na ostrově Utsira [31]

#### 4 Možnosti uskladnění vodíku

Vodík, jeden z nejhojnějších prvků na Zemi, je vysoce hořlavý, malý a lehký. Otázka skladování tohoto prvku obnáší několik kritérií a s nimi souvisí také různé druhy jeho uskladnění. Důležitá je otázka bezpečnosti, protože vodík v koncentraci s kyslíkem je výbušný při koncentraci 4-75 % a možnosti proveditelnosti skladování. Skladování jsou tři způsoby:

- při vysokém tlaku plynu
- v kapalně fázi
- metal-hydridové skladování

V současnosti je nejvyužívanější metoda stlačení vodíku v tlakových lahvích, při vysokém tlaku 200 bar, ale když přijde na již zmiňovanou bezpečnost, technologickou a ekonomickou efektivnost, jeví se výhodnější skladování metal-hydridové.[32]



Obr. 28 – Technologie skladování vodíku jak do MH, tak do tlakových lahví [32]



#### 4.1 Tlakové láhve

Pro ukládání vodíku do tlakových láhví platí, čím vyšším tlakem jsou plněny, tím větší množství se do nich dá uskladnit. Je však potřeba pro plnění tímto způsobem kompresor, který tlak dokáže zvýšit na požadovanou hodnotu, která bývá 200 bar. Při takovém tlaku lze do tlakové láhve vehnat až  $9 \text{ m}^3$  vodíku a při snižování tlaku klesá přímo úměrně množství uskladněného vodíku.

Tlakové láhve jsou vyrobeny z legované chrommolybdenové oceli, jejich hmotnost je 61 kg, vodní objem 50 litrů. Již zmiňovaná náplň  $9 \text{ m}^3$  odpovídá hmotnosti vodíku 0,75 kg.

Nevýhodou takového skladování jsou přísné bezpečnostní podmínky, jak při plnění, tak i při přepravě tlakových lahví. [34]



Obr. 29 – Tlakové láhve [32]

#### 4.2 Kapalný vodík

Kapalný vodík se využívá hlavně u spotřebitelů, kteří potřebují nepřetržitou dodávku vodíku. Díky velmi nízké kondenzační teplotě vodíku, která je  $-252,7 \text{ }^{\circ}\text{C}$  a souvisí s ní nízká účinnost zkapalňovacího zařízení, je proces zkapalnění vodíku podstatně dražší, než např. dusíku.

Pro zkapalňování vodíku se využívá nejčastěji Claudova procesu, který lze popsat ve čtyřech krocích :

- stlačení vodíku a odvedení kompresního tepla
- předchlazení kapalným dusíkem
- expanze v expanzní turbíně a s tím spojené ochlazení
- expanze na Joule-Thomsonově ventilu – další ochlazení až ke zkapalnění

Autocisterna s kapalným vodíkem má přepravní kapacitu 5000 až 47 000 litrů, což odpovídá cca desetinásobku transportní kapacity klasických 200 barových bateriových vozů. Kapalný vodík je z cisterny plněn čerpadlem do kryogenního zásobníku, jehož kapacity bývají na  $5000$  až  $47\,000 \text{ m}^3$  vodíku.[34]

### 4.3 Metalhydridy

Jako další možnost, jak skladovat vodík, je jeho uskladnění do metal-hydridů, které je založeno na principu snadné absorpce plynu určitými materiály, za podmínek vysokého tlaku a mírných teplot. Taková látka následně uvolňuje vodík, je-li zahřívána na vyšší teplotu. V podstatě se dá říct, že tyto materiály nasávají vodík jako houba např. vodu.

Výhodou metal-hydridových systémů na uskladnění vodíku je fakt, že se vodík stává součástí chemické struktur těchto kovů, k čemuž není vyžadován nijak extrémně vysoký tlak ani kryogenních teplot. Vodík je také z metal-hydridů uvolňován při nízkém tlaku, což z nich dělá nejbezpečnější způsob skladování ze uvedených způsobů.

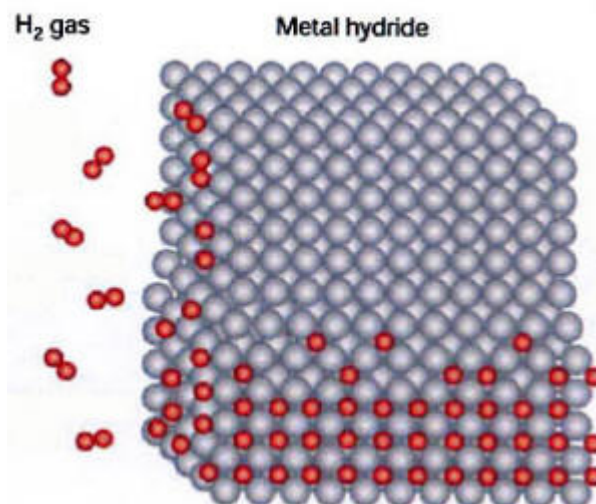
Metal-hydridy jsou hlavně tvořeny z kovových slitin hořčíku, niklu, železa a titanu a dle teplot se dělí s vysokoteplotní a nízkoteplotní desorpcí vodíku. [33]

Vysokoteplotní - jsou levnější než nízkoteplotní, schopné uchovat více vodíku, ale vyžadují více tepelné energie pro jeho uvolnění, takže potřebují externí zdroj tepelné energie. Hlavními typy jsou  $\text{Mg}_2\text{Cu-H}_3$ ,  $\text{Mg}_2\text{Ni-H}_4$  a  $\text{Mg-H}$ .

Nízkoteplotní – tepelnou energii jsou schopné získat z okolí, nízká teplota desorpce však může být problémem, protože vodík se pak uvolňuje příliš snadno, proto musí být pod tlakem, čímž vzrůstá komplikovanost procesu. Typy jsou  $\text{Ti}_2\text{Ni-H}_{2,5}$ ,  $\text{FeTi-H}_2$ ,  $\text{VH-VH}_2$ ,  $\text{LaNi}_5\text{-H}_{6,7}$ . [33]

Hlavní nevýhodou metal-hydridů však není nutnost dodání tepelné energie nebo potřebný tlak pro extrakci vodíku, ale jejich nízká hustota energie. I ty nejlepší metal-hydridy obsahují totiž jen 8% hmotnostního vodíku, což způsobuje jejich velkou hmotnost a nákladnost. Takový systém pak může být i 30-krát těžší a 10-krát objemnější než např. nádrž s benzinem o stejném energetickém obsahu. Další nevýhodou je nutnost používat jen velmi čistý vodík, jinak dochází ke kontaminaci s následnou ztrátou kapacity. Takové snížení kapacity však lze do určité míry reaktivovat teplem.

Struktura metal-hydridů je také jejich problémem, vyrábí se totiž ve formě zrnité, granulované nebo práškové struktury, a to tak, aby poskytovaly co největší plochu pro kontakt s plynem. Tyto částice jsou však náchylné k mechanickému obrušování třením, což vede k redukci jejich efektivity a může také vést k ucpání propouštěcích orgánů nebo trubek. [33]



Obr. 30 – Způsob ukládání vodíku do metal-hydridu [35]



## **5 Metal-hydrid na VŠB-TUO**

Součástí mé diplomové práce je experiment na metal-hydridovém zásobníku, který zakoupila VŠB-TUO, v rámci projektu MSM 619891007 (Výzkum spolehlivosti energetických soustav v souvislosti s ekologií netradičních zdrojů a oceněním nedodané energie). Jedná se zde o zjištění vlastností tohoto zásobníku při různých podmínkách nabíjení a vybíjení. Dále pak bylo nutné realizovat pro tento zásobník chlazení, protože při nabíjení vzniká teplo, které je potřeba odvádět. Stejně tak při vybíjení bylo nutno teplo zásobníku dodat.

### **5.1 Popis laboratoře VŠB-TUO**

Laboratoř, jejíž provoz byl zahájen 11.června 2007, je kompletně vybavena vodíkovým hospodářstvím a rozvodnou technologií vodíku a dusíku, který zde slouží jako bezpečnostní plyn. Vodík je zde skladován ve dvou svazcích po 12 tlakových lahvích o tlaku 200 bar a objemu 9 m<sup>3</sup>. K dispozici je taktéž laboratorní zařízení na výrobu vodíku, v podobě dvou elektrolyzérů Hogen GC600. Elektrolyzéry je možné napájet přímo ze sítě nebo ze solárních panelů, které jsou umístěny na střeše laboratoře.

Demineralizovaná voda, která je potřebná pro výrobu vodíku v elektrolyzéru, se připravuje v osmotické filtrační jednotce. Vyrobený vodík je následně akumulován do menších metal-hydridových zásobníků a nově i do kapacitně většího metal-hydridového zásobníku, který je popsán v další kapitole nebo je možné vyrobený vodík ukládat do tří tlakových lahví, které jsou v laboratoři taktéž umístěny.

Palivové články, které jsou typu PEM od firmy Ballard i elektrolyzéry jsou umístěny v bezpečnostních digestořích, ve kterých se měří případný únik vodíku a jeho koncentrace.

K měření elektrických i neelektrických veličin je v laboratoři realizována měřicí stanice, která je tvořena systémem měřících čidel, jejichž signál je převáděn a vyhodnocován měřicí kartou a zpracováván ve dvou počítačích.

Čidla jsou realizována pomocí napěťových a proudových čidel typu LEM. Pro funkčnost čidel byly navrženy a zkonstruovány podpůrné obvody, které upravují měřicí rozsah čidel a jejich propojení s měřicí kartou. Jedná se o 16-ti bitovou měřicí kartu s USB rozhraním (NI USB-6218).

Naměřená data jsou zobrazována a ukládána pomocí programu vytvořeném v prostředí LabView. V laboratoři se dále nachází střídače Sunny boy, které však zde popisovány nebudou, protože při experimentálním měření s nimi nebylo pracováno.[52]

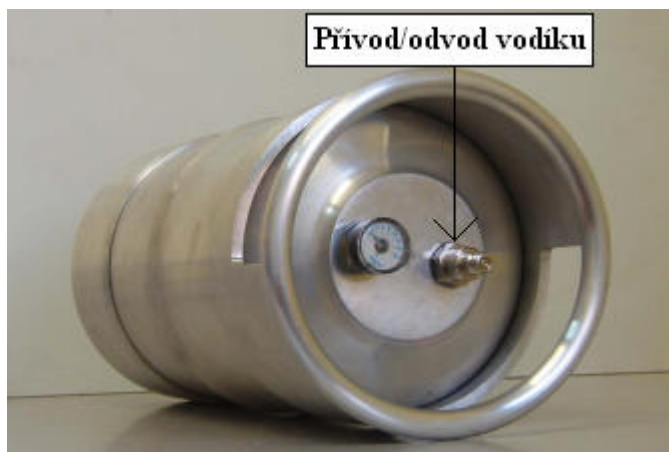
Celé schéma propojení elektrolyzérů, palivového článku, tlakových lahví i metal-hydridového zásobníku je zobrazené v Příloha č.1. Fotografické vyobrazení laboratoře je v Příloha č.2 a Příloha č.3.

## 5.2 Popis Metal-hydridového zásobníku

Jedná se o výrobek bulharské společnosti LabTech Alloys Research Int. Co. Ltd. typu LaNi<sub>5</sub>. Zde jsou technické parametry tohoto zásobníku:

<b>Kapacita vodíku</b>	1500 N l H <sub>2</sub>
<b>Průměr</b>	145 mm
<b>Výška</b>	265 mm
<b>Váha</b>	12 kg ( 9 kg je M-H náplň )
<b>Materiál zásobníku</b>	slitina hliníku Al, typ EN-AA-6063
<b>Výměník</b>	uvnitř zásobníku, materiál je měď Cu
<b>Bezpečnostní ventil</b>	25 bar
<b>Nabíjecí tlak</b>	15 bar
<b>Nabíjecí teplota</b>	25 °C
<b>Doba nabíjení</b>	1 hodina ( s chlazením )
<b>Vybíjecí tlak</b>	2 – 7 bar
<b>Vybíjecí teplota</b>	20 – 40 °C
<b>Materiál hydridu</b>	slitina na bázi niklu Ni, typ LaNi <sub>5</sub>
<b>Reakční teplo</b>	-30,8 kJ/mol
<b>Velikost částic metal-hydridu</b>	méně než 0,1 mm

Tab. 2 – Parametry metal-hydridového zásobníku [36]



Obr. 31 – Metal-hydridový zásobník [36]

### 5.3 Chlazení metal-hydridového zásobníku

Jelikož při plnění metal-hydridového zásobníku vodíkem dochází k vývinu tepla, je potřeba ho průběžně chladit a to tak, aby teplota zásobníku nepřesáhla 25 °C. Teplo, které vzniká při absorpci vodíku metal-hydridem je 400 Wh na každých 1000 l absorbovaného vodíku. V našem případě je proto během nabíjení odvést teplo pro 1500 l vodíku, čili 600 Wh. K zajištění dostatečného chlazení je uvnitř zásobníku zabudován výměník tepla, který je potřeba chladit vodou, v uzavřeném okruhu. [36]

Vycházíme-li z toho, že je potřeba odebrat během hodiny zásobníku tepelnou energii 600 W, je nutno určit množství chladicí vody v okruhu a průtok vody.

#### Množství chladicí vody

Vycházíme z následujícího vztahu:

$$Q = m \cdot c \cdot (t_2 - t_1) \Rightarrow m = \frac{Q}{c \cdot (t_2 - t_1)} = \frac{2140}{4,184 \cdot (20 - 15)} = 102,3 \text{ kg} \Rightarrow m \approx 100 \text{ l} \quad (5.1)$$

kde:  $Q$  ... teplo, vzniklé při reakci (kJ),  
 $m$  ... množství potřebné chladicí vody (kg  $\rightarrow$  l),  
 $t_2$  ... teplota na výstupu výměníku (°C),  
 $t_1$  ... teplota na vstupu výměníku (°C),  
 $c$  ... měrné teplo vody (4,184 J.K<sup>-1</sup>.kg<sup>-1</sup>),

z čehož vychází množství vody potřebné k uchlazení 600 Wh 100 l vody, a jelikož to je řešeno v rámci jedné hodiny, lze určit i potřebný minimální průtok jako 100 l/h.

#### Sestavení chladicího okruhu

Pro splnění podmínek chlazení bylo potřeba navrhnout také samostatný uzavřený chladicí okruh. Po výpočtu potřebného množství vody a průtoku, zbývalo zajistit vhodně oběhové čerpadlo, které zajistí dostatečný průtok a dokáže „protlačit“ vodu přes hydrodynamický odpor celého chladicího okruhu. Dále byl zapotřebí průtokoměr k určení průtoku a zásobník na 100 l chladicí vody s ventilem. Takto vypadal navržený okruh:

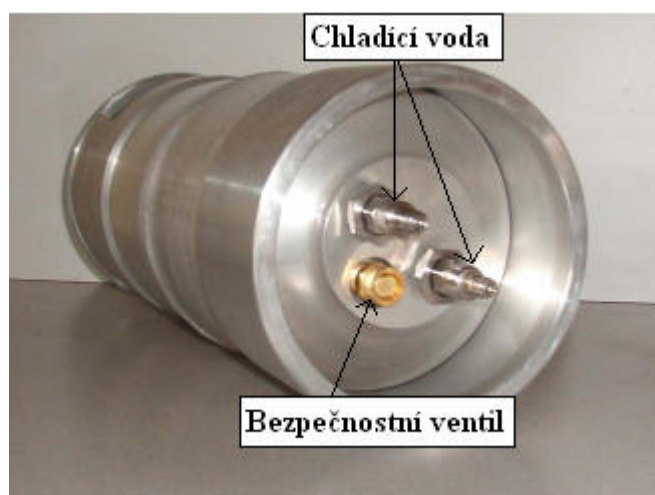


Obr. 32 – Chlazení metal-hydridového zásobníku

Popis komponentů pro chlazení

Obrázek	Název a typ	Parametry
	Oběhové čerpadlo King 3	Max. příkon – 35 W Max. průtok – 2400 l.h <sup>-1</sup> Max. výtlač – 2,4 m
	Plastový zásobník na vodu	Max. objem – 100 l Jeho součástí je kulový ventil
	LCD průtokoměr typ - LCR	14-ti místný displej Možnost programování Vnitřní baterie Nízké náklady

K pospojování celého okruhu bylo zapotřebí dvou druhů hadic, protože vývody výměníku v metal-hydridovém zásobníku měly rozměr 3/8“, kdežto rozměry vstupů a výstupů pro oběhové čerpadlo, průtokoměr a zásobník vody měly rozměr 1/2“. Proto bylo potřeba použít ke spojení těchto dvou hadic redukce.



Obr. 33 – Připojení chlazení k metal-hydridovému zásobníku [36]

Celý proces chlazení bude popsán a vyhodnocen v Kap. 5.4, spolu s popisem nabíjení na metal-hybridového zásobníku.

## 5.4 Měření na metal-hydridovém zásobníku

Měření na metal-hydridovém zásobníku probíhalo několika způsoby, při kterých se zjišťovaly veličiny potřebné ke zjištění celkové účinnosti při výrobě vodíku z elektrolyzéru, množství uskladněného vodíku (nabíjení) a jeho následné proměně na elektrickou energii v palivovém článku (vybíjení). Hlavní měřené veličiny byly:

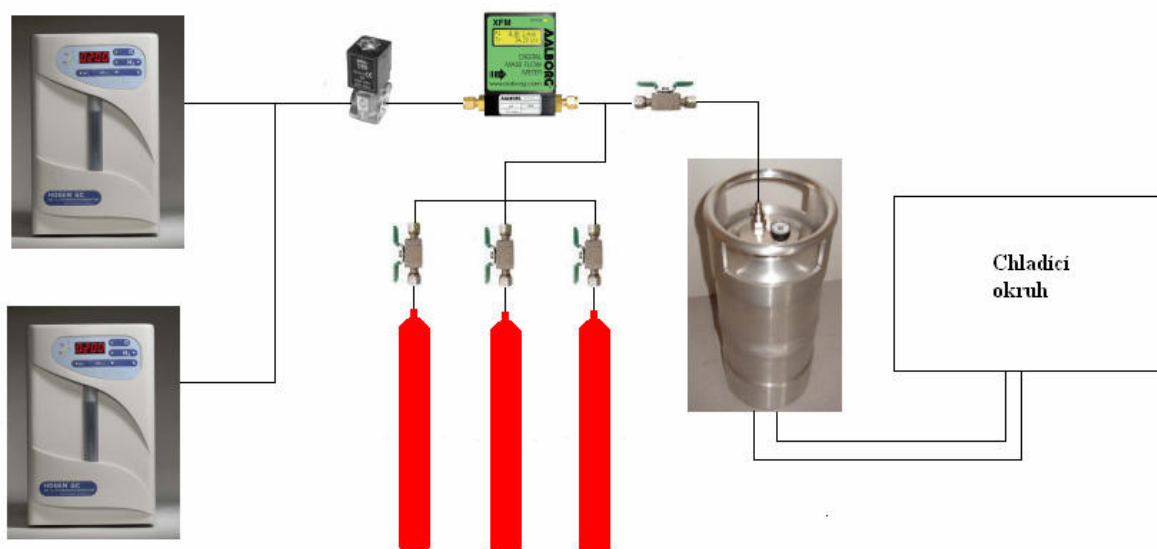
- Teplota vody v zásobníku
- Teplota vody na výstupu z metal-hydridu
- Teplota metal-hydridového zásobníku ( jeho pláště )
- Tlak celého nabíjecího/vybíjecího systému
- Spotřeba elektrolyzérů
- Spotřeba oběhového čerpadla
- Aktuální průtok vodíku
- Celkový průtok vodíku

### 5.4.1 Popis nabíjení metal-hydridového zásobníku

Nabíjení metal-hydridového zásobníku vodíkem bylo prováděno dvěma různými způsoby, protože zásobník o takovém objemu ještě na VŠB-TUO nebyl používán. Proto se musely zjistit hlavně jeho tepelné vlastnosti při nabíjení o různém tlaku.






Nejdříve se měřilo nabíjení vodíkem, vyrobeným v elektrolyzérech Hogen GC600. Byly použity dva elektrolyzéry v paralelním zapojení.

Další měření probíhalo plněním metal-hydridového zásobníku z tlakových lahví, aby bylo možné vyvinout hned na začátku nabíjení požadovaný tlak 15 bar.



Obr. 34 – Schéma zapojení pro nabíjení metal-hydridového zásobníku

Popis schématu zapojení pro nabíjení metal-hydridového zásobníku

Obrázek	Význam a typ	Technické parametry
	2 x Elektrolyzátor Hogen GC600 v.č. GC200701055 v.č. GC201102000	Maximální tlak – 45 - 200 psi 3 - 13,79 bar Výroba vodíku – max. 0,7 l/min Objem nádrže H <sub>2</sub> O – 1,9 l Připojení – 110/240 VAC Příkon – > 1200 W Váha – 24 kg [38]
	Elektromagnetický ventil	Ovládán přes PLC automat [37]
	Průtokoměr H <sub>2</sub> Aalborg XFM17 v.č. 238779-1	2 x LCD displej – aktuální průtok a totalizér rozsah – 0 - 5 l/min digitální rozhraní – RS232, RS485 kalibrační údaje – až pro 10 plynů [39]
	Ventil (kohoutový)	Kohoutový – pro zastavení přívodu tlakových lahví a k metal-hydridovému zásobníku [37]
	Tlaková láhev na H <sub>2</sub>	Max. tlak – 200 bar Množství H <sub>2</sub> – 9 m <sup>3</sup> (při 200 barech) Používaný tlak – 15 bar Množství H <sub>2</sub> – 3 x 675 l (při 15 barech)

Chladicí okruh je popsán v kapitole 5.3, stejně tak jako je metal-hydridový zásobník popsán v kapitole 5.2.

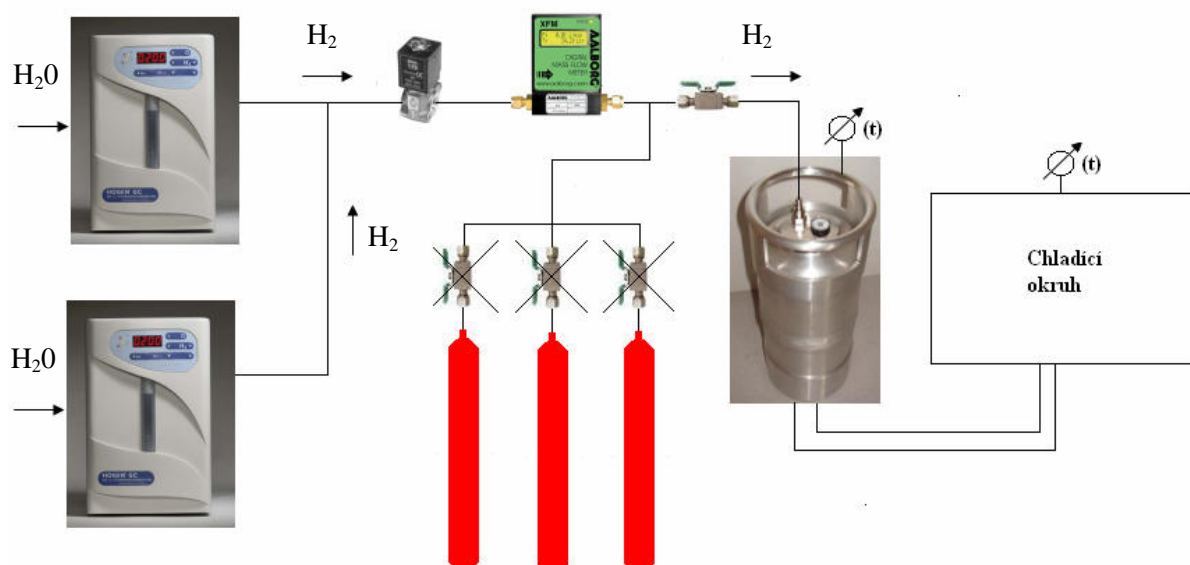
### 5.4.2 1. nabíjení metal-hydridového zásobníku vodíkem z elektrolyzérů

K tomuto způsobu nabíjení byly použity dva paralelně pracující elektrolyzéry na výrobu vodíku, elektromagnetický ventil, průtokoměr, k měření množství vodíku dodaného do metal-hydridového zásobníku a pákový ventil. Tlakové láhve byly zastaveny.

Nejdřív se musely elektrolyzéry zahřát. To znamená natlakovat na maximální tlak, aniž by to systému dodávaly vodík. Až ve chvíli, kdy byly elektrolyzéry natlakované, bylo možné začít dodávat vodík do metal-hydridového zásobníku.

Po začátku nabíjení metal-hydridového zásobníku, ve kterém byl tlak 2 bary, avšak tlak celého systému poklesl na 3 bary, což je minimální tlak elektrolyzérů a tímto tlakem se začal zásobník nabíjet. V průběhu měření, které trvalo 4 hodiny, se postupně zvyšoval tlak celého systému a přitom se plnil zásobník. Plnil se však tlakem nižším, než je tlak požadovaný a maximální množství vodíku, které dokázaly elektrolyzéry vyrobit, bylo 1,2 l/min, takže nedocházelo k žádným rapidním změnám v teplotě zásobníku a neměřila se výstupní teplota vody z metal-hydridu. Nedokázal se ale nabít na plnou kapacitu. Při 20 %-ním naplnění, klesl průtok vodíku dodávaného z elektrolyzérů, resp. zásobník přestal přijímat vodík. V tu chvíli bylo měření ukončeno.

#### Schéma nabíjení z elektrolyzérů



Obr. 35 – Nabíjení metal-hydridu pouze z elektrolyzérů

Tlak byl odečítán z digitálního displeje na elektrolyzéru Hogen GC600, v chladicím okruhu byl měřena teploty vody v nádrži s chladicí vodou pomocí digitální teploměru. Teplota pláště metal-hydridu se měřila na jeho spodní části, kde byl připevněn snímač teploty. Průtok vody byl po celou dobu konstantní, stejně tak jako spotřeba oběhového čerpadla. Spotřeba elektrolyzérů, které byly napájeny přímo ze sítě, se měřila pomocí měřícího přístroje Energy Logger 3000, který mohl zobrazit více veličin, jako např. účinnost, aktuální odběr, celkovou spotřebu, dobu provozu, atp. Ventily na tlakových lahvích byly uzavřeny.

Spotřeby jednotlivých elektrolyzérů se liší, protože jeden je starší a má za sebou více pracovních hodin. Právě ten má spotřebu vyšší.



Naměřené a vypočtené hodnoty

Veličina	Zahřívání	Plnění	Jednotky
<b>Celkový čas</b>	10	300	<b>min</b>
<b>T vody (min-max)</b>	16,5	16,5 - 19,9	<b>°C</b>
<b>T pláště (min-max)</b>	17,1	17,1 - 21,9	<b>°C</b>
<b>Tlak systému (min-max)</b>	-	3,93 - 13,79	<b>bar</b>
<b>Průtok vody</b>	-	1,9	<b>kWh</b>
<b>Spotřeba čerpadla</b>	-	0,09	<b>l/min</b>
<b>Spotřeba ELC levý</b>	0,058	1,583	<b>kWh</b>
<b>Spotřeba ELC levý</b>	0,058	1,668	<b>kWh</b>
<b>Průtok vodíku (min-max)</b>	-	0,28 - 1,21	<b>l/min</b>
<b>Množství vodíku</b>	-	304	<b>l</b>

Tab. 3 – Naměřené hodnoty při 1. měření nabíjení metal-hydridového zásobníku

Hodnoty v Tab.3 jsou rozepsány pouze od minimální po maximální hodnotu. Grafická závislost při prvním nabíjení je v Příloha č.4 a v Příloha č.5. Z této tabulky se také vypočítá celková spotřeba elektrické energie pro dané množství vodíku vyrobeného v elektrolyzérech, což je 300 l.

Celková spotřeba elektrické energie

$$E_{c(1)} = E_{\dot{c}(1)} + E_{ELC1z} + E_{ELC2z} + E_{ELC1p} + E_{ELC2p} \quad (5.2)$$

$$E_{c(1)} = 0,09 + 0,058 + 0,058 + 1,583 + 1,668$$

$$E_{c(1)} = 3,457 \text{ kWh}$$

kde:  $E_{c(1)}$  ... celková spotřebovaná energie při 1. nabíjení (kWh),  
 $E_{\dot{c}(1)}$  ... energie spotřebovaná oběhovým čerpadlem při 1. nabíjení (kWh),  
 $E_{ELC1z}$  ... energie spotřebovaná 1. elektrolyzérem na zahřátí při 1. nabíjení (kWh),  
 $E_{ELC2z}$  ... energie spotřebovaná 2. elektrolyzérem na zahřátí při 1. nabíjení (kWh),  
 $E_{ELC1p}$  ... energie spotřebovaná 1. elektrolyzérem během plnění při 1. nabíjení (kWh),  
 $E_{ELC2p}$  ... energie spotřebovaná 2. elektrolyzérem během plnění při 1. nabíjení (kWh).

**5.4.3 1. vybíjení metal-hydridového zásobníku do palivového článku NEXA**

Po prvním zkušebním nabití metal-hydridového zásobníku, bylo provedeno jeho první vybití pouze zkušební, jelikož se ho povedlo naplnit pouze 300 litry H<sub>2</sub>. NEXA se nastavila na plný výkon, který dodávala ne do zátěže, ale přímo do sítě. Ostatní vybíjení už probíhalo do zátěže, na které se nastavil požadovaný odběr. Při takto nastaveném výkonu se zásobník vybíjen pouze cca 7 minut a bylo z něj spotřebováno cca 50 l vodíku. Proto se vybíjení zastavilo, v zásobníku se ponechalo zbylých 250 l vodíku a začal se znovu nabíjet. Po dalším nabití se již měřili hodnoty při vybíjení. Proto také nebylo možné vypočítat účinnost. Ta je ale spočítána u dalšího nabití.

#### 5.4.4 2. nabíjení metal-hydridového zásobníku vodíkem z elektrolyzáru

Jak již bylo zmíněno na předchozí straně, toto měření bylo opakované, doplňující k měření prvnímu, protože při vybíjení metal-hydridového zásobníku do palivového článku, který byl připojený přímo do sítě, docházelo k jeho příliš rychlému vybíjení. Tak se vybíjení zastavilo, v zásobníku zůstalo cca 250 l vodíku a začal se znovu nabíjet.

Jednak se zkoušelo, jestli to první měření nemohlo být pouze „aktivační“, tzn. k oživení metal-hydridového zásobníku a jeho celkové kapacity a na druhou stranu, i kdyby aktivace nebyla zapotřebí, bylo potřeba ho znovu doplnit aspoň na těch 300 l vodíku a kompletně vybit do palivového článku. Povedlo se však naplnit metal-hydridový zásobník na 400 l vodíku

V průběhu měření bylo navíc vyzkoušeno chvilkové odpojení od dodávky vodíku, chlazení zásobníku bez absorpce vodíku, načež následovalo opětovné připojení. To vše také jako zkouška o naplnění zásobníku větším množstvím vodíku.

Schéma nabíjení je úplně stejné jako v případě prvního nabíjení metal-hydridového zásobníku a grafické průběhy z 2. nabíjení metal-hydridového zásobníku jsou v Příloze č.6 a Příloze č.7.

##### Naměřené hodnoty

Veličina	Zahřívání	250 l z 1.plnění	2.plnění	Jednotka
<b>Celkový čas</b>	10	210	140	<b>min</b>
<b>T vody (min-max)</b>	16,5	16,5 - 19,2	19,1 - 20,5	<b>°C</b>
<b>T pláště (min-max)</b>	17,1	17,1 - 21,4	19,8 - 21,8	<b>°C</b>
<b>Tlak systému (min-max)</b>	-	3,93 - 11,38	4,83 - 13,86	<b>bar</b>
<b>Průtok vody</b>	-	1,9	1,9	<b>l/min</b>
<b>Spotřeba čerpadla</b>	-	0,00525	0,0035	<b>kWh</b>
<b>Spotřeba ELC levý</b>	0,058	1,3	0,812	<b>kWh</b>
<b>Spotřeba ELC levý</b>	0,058	1,273	0,843	<b>kWh</b>
<b>Průtok vodíku (min-max)</b>	-	0,28 - 1,21	0,32 - 1,4	<b>l/min</b>
<b>Množství vodíku</b>	-	255	150	<b>l</b>

Tab. 4 – Hodnoty pro 2. nabíjení metal-hydridového zásobníku

##### Celková spotřeba elektrické energie

$$E_{s(2)} = E_{\dot{c}(1)} + E_{ELC1z} + E_{ELC2z} + E_{ELC1p(1)} + E_{ELC2p(1)} + E_{\dot{c}(2)} + E_{ELC1p(2)} + E_{ELC2p(2)}$$

$$E_{s(2)} = 0,003 + 0,058 + 0,058 + 1,3 + 1,273 + 0,00525 + 0,812 + 0,843$$

$$E_{s(2)} = 4,353 \text{ kWh} \quad (5.3)$$

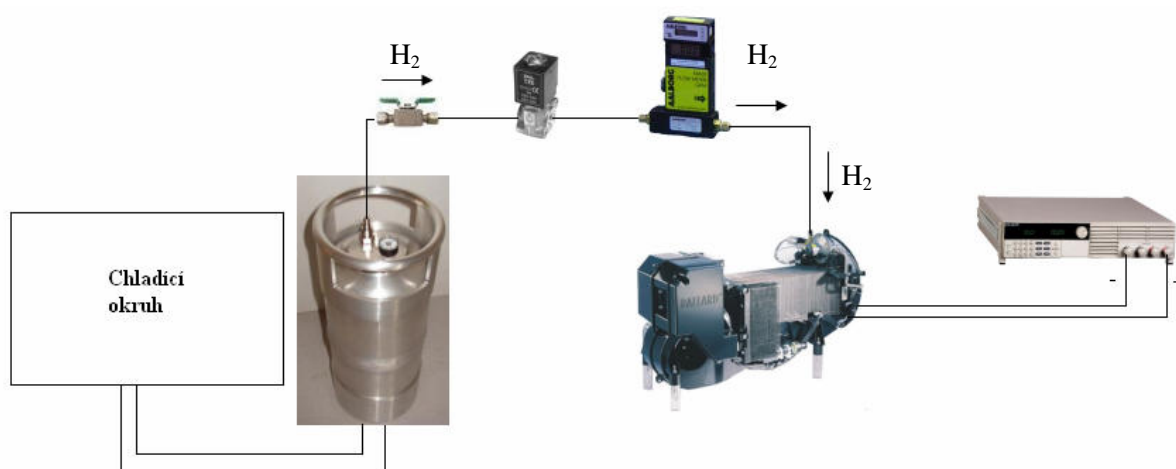
kde:  $E_{s(2)}$  ... celková energie spotřebovaná při druhém nabíjení (kWh),  
 $E_{\dot{c}(2)}$  ... energie spotřebovaná oběhovým čerpadlem při druhém nabíjení (kWh),  
 $E_{ELC1p(2)}$  ... energie spotřebovaná 1. elektrolyzérem při 2. nabíjení (kWh),  
 $E_{ELC2p(2)}$  ... energie spotřebovaná 2. elektrolyzérem při 2. nabíjení (kWh),  
 $E_{\dot{c}(1)}, E_{ELC1z}, E_{ELC2z}, E_{ELCp(1)}, E_{ELCp(1)}$  ... spotřebované energie pro dané množství vodíku z 1. nabíjení (kWh).

### 5.4.5 2. vybíjení metal-hydridového zásobníku do palivového článku NEXA

Při tomto vybíjení již byla k palivovému článku připojena zátěž, na kterou bylo možné nastavit odebíraný výkon z palivového článku. V tomto případě byl odebíraný výkon nastaven na 300 W. Metal-hydridový zásobník byl nabit z předchozího nabíjení na přibližně 400 l vodíku.

Měření na palivovém článku bylo prováděno dvěma způsoby. Jeden snímal hodnoty přímo na výstupu palivového článku a výkon byl měřen i s vlastní spotřebou palivového článku, která má vzestupnou velikost se zvětšujícím se zatížením. To vše je měřeno přes vlastní měřicí karty patřící k palivovému článku NEXA. Druhý způsob byl vyhodnocován pomocí programu LabView, kde se již snímají hodnoty bez vlastní spotřeby palivového článku. Kompletní popis a zapojení zařízení laboratoře je v kapitole č. 5.1 a v Příloze č.1.

#### Schéma vybíjení zásobníku




Obr. 36 – Schéma vybíjení zásobníku do palivového článku NEXA

Při tomto měření nebyly zaznamenávány teploty chladicího okruhu, teplota metal-hydridového zásobníku ani tlak systému, jelikož k vybíjení metal-hydridového zásobníku stačila teplota okolí a teplota, kterou měla chladicí voda nijak zásobník neovlivňovala. Tlak byl orientačně určován podle ukazatele tlaku na metal-hydridovém zásobníku, a to do té doby, než se dostal tlak k hodnotě 2 barů, což je pro metal-hydridový zásobník minimum.

Veškeré měřené hodnoty byly zaznamenávány z průtokoměru i z palivového článku přímo v PC, kde se také archivovaly. V případě množství vodíku byl vzorek odebírán jednou za sekundu, v případě snímání veličin z palivového článku, bylo odebíráno pět vzorků za sekundu. Hlavní měřené veličiny byly:

- |                    |                                       |
|--------------------|---------------------------------------|
| - Doba měření      | - Napětí stacku                       |
| - Množství vodíku  | - Proud stacku                        |
| - Tlak systému     | - Teplota stacku                      |
| - Výkon            | - Teplota vody v nádrži               |
| - Vlastní spotřeba | - Teplota metal-hydridového zásobníku |

Popis schématu zapojení pro vybíjení metal-hydridového zásobníku

Obrázek	Význam a typ	Technické parametry
	Palivový článek fa Ballard – Nexa v.č. 01276	Maximální výkon – 1200 W Výstupní napětí – 22 – 50 V Maximální hlučnost – 72 dBA Váha – 13 kg Maximální provozní doba – 1500 h Maximální produkce vody – 870 ml/h Minimální množství cyklů zap/vyp - 500 Vstupní tlak – 0,7 – 17,2 bar Rozsah teplot – 3- 40 °C [53]
	Elektromagnetický ventil	Ovládán přes PLC automat [37]
	Průtokoměr H <sub>2</sub> fa Aalborg GFM37 v.č. 226384-2	2 x LCD displej – aktuální průtok a totalizér rozsah – 0 - 20 l/min digitální rozhraní – RS232, RS485 max. tlak – 68 bar
	Ventil (kohoutový)	Kohoutový – pro zastavení přívodu do metal-hydridu
	Stejnoseměrná DC zátěž fa ITECH IT8514C	Rozsah napětí – 0 – 120 V Rozsah proudu – 0 – 240 A Maximální výkon – 1200 W Displej - digitální

Metal-hydridový zásobník je popsán v Kap. 5.2 a chladicí okruh je popsán v Kap.5.3.

Naměřené a vypočtené hodnoty

Veličina	Hodnota	Jednotky
Doba měření	1,5	h
Množství H <sub>2</sub>	404	l
Tlak systému	11,63 - 2,32	bar
Výkon	300	W
Vlastní spotřeba	63 - 70	W
Průtok vodíku	4,52	l/min
Průměrné napětí stacku	36	V
Průměrný proud stacku	10,6	A
Teplota stacku	23,65 - 39,72	°C
Teplota vody v nádrži	18,7 - 18,1	°C
Teplota zásobníku	20,3 - 19,3	°C

Tab. 5 – Naměřené hodnoty při 2. vybíjení na palivovém článku NEXA

Grafické zobrazení průběhů z tohoto měření je v Příloha č. 8, v Příloha č. 9 a Příloha č.10. Z tohoto měření již lze určit účinnost celého procesu, zahrnující nabíjení metal-hydridového zásobníku z elektrolyzérů HOGEN GC600 a jeho následné vybití vodíku, který se z nich v zásobníku naakumuloval, do palivového článku NEXA.

Dodaná energie z palivového článku za dobu měření

Tato energie byla vypočítána z průměrné hodnoty výkonu, který palivový článek dodával po dobu měření do zátěže. Výkon byl vypočítán ze všech naměřených vzorků, zaznamenaných v programu LabView (bez vlastní spotřeby palivového článku).

$$E_{v(2)} = P_{d(2)} \cdot t_{v(2)} = 317,094 \cdot 1,5 = 475,641 \Rightarrow 0,476 \text{ kWh} \quad (5.4)$$

kde:  $E_{v(2)}$  ... energie vyrobená palivovým článkem při 2. vybíjení (kWh),  
 $P_{d(2)}$  ... průměrná hodnota výkonu ze všech naměřených vzorků (W),  
 $t_{v(2)}$  ... doba měření (h).

Účinnost celého 2. procesu nabíjení / vybíjení

$$\eta_{(2)} = \frac{E_{v(2)}}{E_{c(2)}} = \frac{0,476}{4,353} = 0,1093 \Rightarrow \eta_{(2)\%} = \eta_{(2)} \cdot 100 = \underline{\underline{10,93 \%}} \quad (5.5)$$

kde:  $\eta_{(2)}$  ... účinnost celého procesu (-),  
 $E_{v(2)}$  ... energie vyrobená při vybíjení (kWh),  
 $E_{c(2)}$  ... energie spotřebovaná při 2. nabíjení z elektrolyzérů (kWh),  
 $\eta_{(2)\%}$  ... účinnost celého procesu (%).

Celková účinnost celého procesu je 10,93 %. Malá hodnota je pravděpodobně způsobena dlouhým nabíjením metal-hydridového zásobníku z elektrolyzérů, které byly napájeny ze sítě.

Výpočet účinností jednotlivých zařízení

Celková účinnost je složena s účinnosti elektrolyzérů, palivového článku a uložení vodíku v metal-hydridovém zásobníku. Při výpočtu účinnosti elektrolyzérů a palivového článku vycházíme z ekvivalentního množství energie ve vodíku (5.6). Účinnost metal-hydridového zásobníku je dopočítána z celkové účinnosti celého procesu nabíjení / vybíjení v poměru s účinnostmi elektrolyzérů a palivového článku.

Ekvivalentní množství energie ve vodíku při 2. nabíjení / vybíjení

$$E_{H2(2)} = \frac{V_{H2(2)}}{V_{molH2(2)}} \cdot Q_t \cdot U_{ROV} = \frac{404}{22,414} \cdot 53,596 \cdot 1,23 = 1188 \text{ Wh} \Rightarrow 1,188 \text{ kWh} \quad (5.6)$$

kde:  $E_{H2(2)}$  ... ekvivalentní množství energie ve vodíku při 2. nabíjení/vybíjení (kWh),  
 $V_{H2(2)}$  ... množství vyrobeného vodíku (l),  
 $Q_t$  ... velikost elektrického náboje potřebného pro výrobu 1 molu vodíku (A.h),  
 $U_{ROV}$  ... rovnovážné napětí chemické reakce probíhající v elektrolyzérů (V),  
 $V_{molH2(2)}$  ... objem 1 molu vodíku (l).

Účinnost elektrolyzérů

$$\eta_{ELC(2)} = \frac{E_{H2(2)}}{E_{s(2)}} = \frac{1,188}{4,353} = 0,273 \Rightarrow \eta_{ELC(2)\%} = \eta_{ELC(2)} \cdot 100 = 27,3 \% \quad (5.7)$$

kde:  $\eta_{ELC(2)}$  ... celková účinnost elektrolyzérů při 2. procesu nabíjení / vybíjení (-),  
 $E_{H2(2)}$  ... ekvivalentní množství energie ve vodíku (kWh),  
 $E_{s(2)}$  ... elektrická energie spotřebovaná elektrolyzéry při 2. nabíjení (kWh),  
 $\eta_{ELC(2)\%}$  ... celková účinnost elektrolyzérů při 2. procesu nabíjení / vybíjení (%).

Účinnost palivového článku

$$\eta_{FC(2)} = \frac{E_{v(2)}}{E_{H2(2)}} = \frac{0,476}{1,188} = 0,401 \Rightarrow \eta_{FC(2)\%} = \eta_{FC(2)} \cdot 100 = 40,1 \% \quad (5.8)$$

kde:  $\eta_{FC(2)}$  ... celková účinnost elektrolyzérů při 2. procesu nabíjení / vybíjení (-)  
 $E_{H2(2)}$  ... ekvivalentní množství energie ve vodíku (kWh)  
 $E_{v(2)}$  ... elektrická energie spotřebovaná elektrolyzéry při 2. nabíjení (kWh)  
 $\eta_{FC(2)\%}$  ... celková účinnost elektrolyzérů při 2. procesu nabíjení / vybíjení (%)

Účinnost metal-hydridového zásobníku

$$\eta_{M-H} = \frac{\eta_{(2)}}{\eta_{ELC(2)} \cdot \eta_{FC(2)}} = \frac{0,109}{0,273 \cdot 0,401} = 0,996 \quad (5.9)$$

$$\eta_{M-H \%} = \eta_{M-H} \cdot 100 = 99,6 \% \quad (5.10)$$

kde:  $\eta_{M-H}$  ... účinnost metal-hydridového zásobníku (-)  
 $\eta_{(2)}$  ... účinnost celého 2. procesu nabíjení / vybíjení (-)  
 $\eta_{ELC(2)}$  ... účinnost elektrolyzérů (-)  
 $\eta_{FC(2)}$  ... účinnost palivového článku (-)

Při tomto způsobu vybíjení nebylo potřeba dodávat zásobníku žádné teplo a nebyl ani chlazen, proto je účinnost vcelku vysoká.



### 5.4.6 3. nabíjení metal-hydridového zásobníku vodíkem z tlakových lahví

Jelikož u prvních dvou způsobů nabíjení metal-hydridového zásobníku z elektrolyzérů nedošlo k dostatečnému využití jeho kapacity, rozhodlo se na zkoušku připojit metal-hydridový zásobník přímo k tlakovým lahvím, které již dokázaly dodat vodík hned ze začátku o vyšším tlaku, než elektrolyzéry.

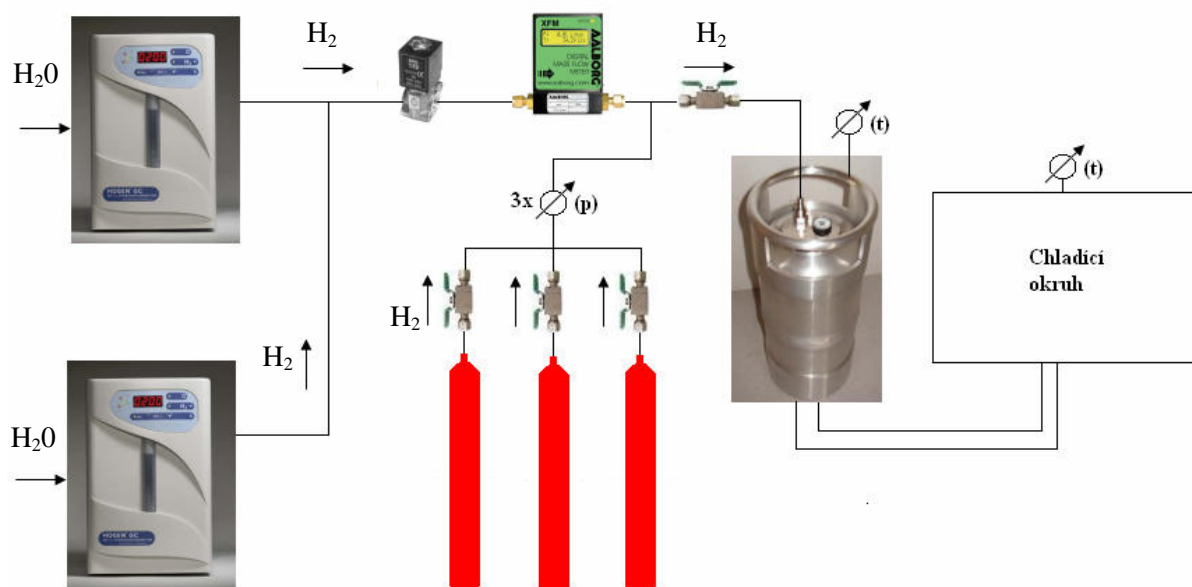
Toto měření bylo pouze zkušební, elektrolyzéry zobrazovaly tlak celého systému, vodík dodávaly pouze tlakové láhve. Nádrž s chladicí vodou byla naplněna 50l vody, o teplotě 18 °C. Od této teploty se také odvíjela teplota metal-hydridového zásobníku, která byla 19,7 °C.

Jakmile se spustilo plnění metal-hydridového zásobníku, jeho teplota během pěti minut prudce vzrostla. Aby nedošlo k překročení maximální dovolené teploty metal-hydridového zásobníku 25 °C, byla dodávka vodíku pozastavena a doplněna voda v nádrži na 75 l, tím se ochladila na 16,9 °C. Tlak však již při prvním připojení klesnul, tak při druhém připojení již k takovému výkyvu teploty nedošlo a měření bylo po 20 minutách ukončeno. Konečný tlak zůstal na hodnotě 12,27 bar. Zajímavé je však množství vodíku, kterým se metal-hydridový zásobník naplnil za tento krátký časový interval. Bylo ho celkem 225 l, jak je spočteno u naměřených hodnot.

Bylo rozhodnuto tento způsob plnění zopakovat, avšak s nižší teplotou chladicí vody, aby již teplota metal-hydridového zásobníku nemohla překročit daných 25 °C. K tomu ovšem bylo potřeba znova naplnit tlakové láhve vodíkem z elektrolyzérů. Kompletní popis je ve 4. plnění metal-hydridového zásobníku.

Jelikož byly hodnoty teplot a tlaku odečítány po 5min intervalu, což je dlouhá doba, nejsou u tohoto způsobu nabíjení vykresleny grafické průběhy. Ty jsou vytvořeny Kap. 5.4.8 a Kap.5.4.9.

#### Schéma nabíjení z tlakových lahví a elektrolyzérů



Obr. 37 – Nabíjení metal-hydridu z tlakových lahví a elektrolyzérů

Naměřené a vypočtené hodnoty

Veličina	Zahřívání	Elektrolyzér	Tlakové láhve	Jednotky
<b>Celkový čas</b>	-	20	20	<b>min</b>
<b>T vody</b>	-	18,0 - 15,7	18,0 - 15,7	<b>°C</b>
<b>T pláště</b>	-	19,7 - 23,4	19,7 - 23,4	<b>°C</b>
<b>Tlak systému</b>	-	13,79 - 12,27	13,79 - 12,27	<b>bar</b>
<b>Průtok vody</b>	-	1,9	1,9	<b>kWh</b>
<b>Spotřeba čerpadla</b>	-	0,00025	0,0025	<b>l/min</b>
<b>Spotřeba ELC levý</b>	0,058	0,138	1,06	<b>kWh</b>
<b>Spotřeba ELC levý</b>	0,058	0,139	1,06	<b>kWh</b>
<b>Průměrný průtok vodíku</b>	-	1,2	12,6	<b>l/min</b>
<b>Množství vodíku</b>	-	24	205	<b>l</b>

Tab. 6 – Naměřené hodnoty při 3. měření nabíjení metal-hydridového zásobníku

Množství vyrobeného vodíku nebylo měřeno, ale vypočteno podle poklesu tlaku v celém systému a z průměrné výroby vodíku z elektrolyzérů.

Množství vodíku zbylého v jedné tlakové láhvi

$$V_{ZH_2(3)} = \frac{V_{tl}}{P_{tl\max}} \cdot P_{tl\min(3)} = \frac{621}{13,79} \cdot 12,27 = 552,6 \text{ l} \quad (5.11)$$

kde:  $V_{ZH_2(3)}$  ... zbylé množství vodíku tlakových lahví při 3. nabíjení (l),  
 $V_{tl}$  ... maximální množství vodíku v tlakové láhvi (l),  
 $P_{tl\max}$  ... maximální tlak při  $V_{tl}$  (bar),  
 $P_{tl\min(3)}$  ... minimální tlak při  $V_{ZH_2(3)}$  (bar).

Množství vodíku dodaného ze tří lahví do zásobníku

$$V_{H_2(3)} = (V_{tl} - V_{ZH_2(3)}) \cdot 3 = (621 - 552,6) \cdot 3 = 68,4 \cdot 3 = 205,2 \text{ l} \quad (5.12)$$

kde:  $V_{H_2(3)}$  ... množství dodaného vodíku z tlakových lahví (l),  
 $V_{tl}$  ... maximální množství vodíku v tlakové láhvi (l),  
 $V_{ZH_2(3)}$  ... množství zbylého vodíku v jedné tlakové láhvi (l).

Spotřeba elektrické energie při plnění tlakových lahví z elektrolyzérů

Vychází ze spotřeb elektrolyzérů při 1. nabíjení metal-hydridového zásobníku, protože přímo tento způsob plnění nebyl zaznamenáván. Základem je spotřeba elektrické energie pro výrobu 100 l vodíku. V tomto případě uvažujeme spotřebu stejnou u obou elektrolyzérů.

$$E_{205} = \frac{V_{H_2(3)} \cdot E_{100}}{V_{100}} = \frac{205,2 \cdot 0,517}{100} = 1,06 \text{ kWh} \quad (5.13)$$

kde:  $E_{205}$  ... spotřeba elektrické energie na výrobu 205 l vodíku (kWh),  
 $V_{H2(3)}$  ... množství dodaného vodíku do tlakových lahví při 3. nabíjení (l),  
 $E_{100}$  ... spotřeba elektrické energie na výrobu 100 l vodíku (kWh),  
 $V_{100}$  ... množství vodíku vyrobeného se spotřebou  $E_{100}$  (l).

#### Celková spotřeba elektrické energie

$$E_{s(3)} = E_{\check{c}(3)} + E_{ELC1z} + E_{ELC2z} + E_{ELC1p} + E_{ELC2p} + E_{ELC1hl} + E_{ELC2hl} \quad (5.14)$$

$$E_{s(3)} = 0,00025 + 0,058 + 0,058 + 0,138 + 0,139 + 1,06 + 1,06 + 1,668$$

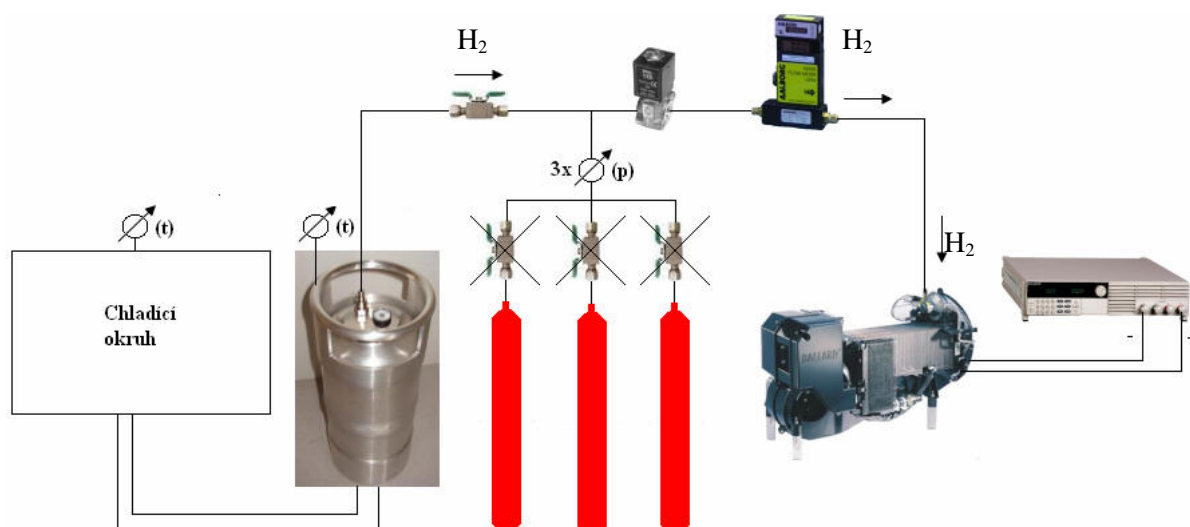
$$E_{s(3)} = 2,51575 \text{ kWh}$$

kde:  $E_{s(3)}$  ... celková spotřebovaná energie při 3. nabíjení (kWh),  
 $E_{\check{c}(3)}$  ... energie spotřebovaná oběhovým čerpadlem při 3. nabíjení (kWh),  
 $E_{ELC1z}$  ... energie spotřebovaná 1. elektrolyzérem během zahřívání (kWh),  
 $E_{ELC2z}$  ... energie spotřebovaná 2. elektrolyzérem během zahřívání (kWh),  
 $E_{ELC1p}$  ... energie spotřebovaná 1. elektrolyzérem při 3. nabíjení (kWh),  
 $E_{ELC2p}$  ... energie spotřebovaná 2. elektrolyzérem při 3. nabíjení (kWh),  
 $E_{ELC1hl}$  ... energie spotřebovaná 1. elektrolyzérem na naplnění tlakových lahví (kWh),  
 $E_{ELC2hl}$  ... energie spotřebovaná 2. elektrolyzérem na naplnění tlakových lahví (kWh).

#### **5.4.7 3. vybíjení metal-hydridového zásobníku do palivového článku NEXA**

Při tomto vybíjení bylo na zátěži nastavena hodnota 900 W. Vybíjení trvalo 18 min. Při tomto vybíjení ještě nebylo reakci dodáváno teplo, protože se v metal-hydridovém zásobníku nacházelo pouhých 225 l vodíku.

#### Schéma 3.vybíjení metal-hydridového zásobníku do palivového článku



Obr. 38 – 3. vybíjení metal-hydridového zásobníku do palivového článku

Teploty a tlak při tomto měření byly odečítány v intervalu pěti minut, data z palivového článku byla ukládána s frekvencí 5 vzorku za sekundu. Měřené veličiny byly:

- Doba měření
- Množství vodíku
- Tlak systému
- Výkon
- Vlastní spotřeba
- Napětí stacku
- Proud stacku
- Teplota stacku
- Teplota vody v nádrži
- Teplota metal-hydridového zásobníku

#### Naměřené a vypočtené hodnoty

Veličina	Hodnota	Jednotky
Doba měření	18	min
Množství H <sub>2</sub>	229	l
Tlak systému	13,8 - 2,3	bar
Výkon	900	W
Průměrná vlastní spotřeba	161	W
Průměrný průtok vodíku	12,7	l/min
Průměrné napětí stacku	32,45	V
Průměrný proud stacku	33,63	A
Teplota stacku	31,8 - 62,6	°C
Teplota vody v nádrži	16,2 - 16,3	°C
Teplota zásobníku	18,6 - 16,2	°C

Tab. 7 – Naměřené hodnoty při 3. vybíjení

#### Dodaná energie z palivového článku za dobu měření

Tato energie byla vypočítána z průměrné hodnoty výkonu, který palivový článek dodával po dobu měření do zátěže. Výkon byl vypočítán ze všech naměřených vzorků, zaznamenaných v programu LabView (bez vlastní spotřeby palivového článku).

$$E_{v(3)} = P_{d(3)} \cdot t_{v(3)} = 930,323 \cdot 0,3 = 279,097 \text{ Wh} \Rightarrow 0,279 \text{ kWh} \quad (5.15)$$

kde:  $E_{v(3)}$  ... energie vyrobená palivovým článkem při 2. vybíjení (kWh),  
 $P_{d(3)}$  ... průměrná hodnota výkonu ze všech naměřených vzorků (W),  
 $t_{v(3)}$  ... doba měření (h).

Účinnost celého 2. procesu nabíjení / vybíjení

$$\eta_{(3)} = \frac{E_{v(3)}}{E_{s(3)}} = \frac{0,279}{2,516} = 0,111 \Rightarrow \eta_{(3)\%} = \eta_{(3)} \cdot 100 = \underline{\underline{11,1 \%}} \quad (5.16)$$

kde:  $\eta_{(3)}$  ... účinnost celého procesu (-),  
 $E_{v(3)}$  ... energie vyrobená při vybíjení (kWh),  
 $E_{s(3)}$  ... energie spotřebovaná při 3. nabíjení z elektrolyzérů (kWh),  
 $\eta_{(3)\%}$  ... účinnost celého procesu (%).

#### 5.4.8 4. nabíjení metal-hydridového zásobníku z tlakových lahví

Jelikož při předchozích způsobech nabíjení z elektrolyzérů HOGEN GC600 nebylo dosaženo příliš dobrých hodnot, jak vzhledem k účinnosti, tak i k množství naakumulovaného vodíku v metal-hydridovém zásobníku, bylo přistoupeno k nabíjení přímo z tlakových lahví, za podpory elektrolyzérů.

Tlakové lahve byly naplněny na svou maximální kapacitu, které lze dosáhnout při plnění z elektrolyzérů, takže cca 3x621 l vodíku při tlaku 13,79 bar, což je maximální možný tlak vyvinutý elektrolyzéry.

Voda v chladicím okruhu musela být mít nižší teplotu, než při plnění z elektrolyzérů, protože tomuto měření předcházelo jedno velice krátké, zkušební nabití přímo z tlakových lahví, při kterém se díky vyšší teplotě chladicí vody začal metal-hydridový zásobník příliš rychle zahřívat. Tak muselo být měření ukončeno, aby nedošlo k překročení maximální teploty nabíjení (25 °C). Proto bylo měření rozšířeno ještě o jednu hodnotu, konkrétně o teploty vody přímo na výstupu metal-hydridového zásobníku. Následně se vypustila nádrž s chladicí vodou a byla dopuštěna vodou s výrazně nižší teplotou. Nádrž s chladicí vodou byla napuštěna na svou maximální kapacitu, takže 100 l vody a teplota vody byla 8°C. Chvilí před začátkem měření se spustil chladicí okruh, aby byl zásobník ochlazen na nižší teplotu.

Měřené veličiny byly:

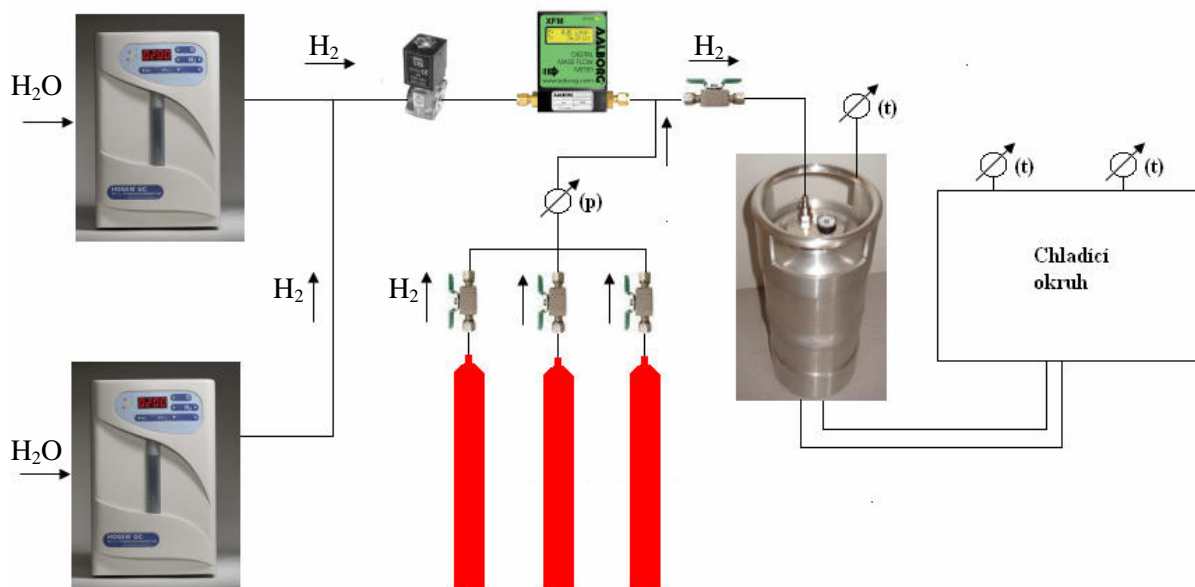
- teplota vody v chladicí nádrži,
- teplota vody na výstupu metal-hydridového zásobníku,
- teplota pláště metal-hydridového zásobníku,
- tlak systému,
- množství naakumulovaného vodíku,
- aktuální průtok vodíku.

Odečítání a zapisování hodnot probíhalo v různých časových intervalech, protože teplota metal-hydridového zásobníku při počátečním připojení na tlak 13,79 bar prudce stoupala, takže se měřilo v 15s intervalech. Ve chvíli, kdy se teplota přestala tak rychle měnit, se měřilo po 30s a když už přestal klesat i tlak, zastavila se dodávka vodíku z tlakových lahví a nechaly se připojené na nějakou dobu pouze elektrolyzéry.

Tlakové lahve byly zastaveny po 41 minutách dodávání vodíku. Množství vodíku dodaného do metal-hydridového zásobníku přímo z tlakových lahví bylo možné zjistit pouze výpočtem, jelikož průtokoměry v laboratoři nemají dostatečná měřicí rozsah. Množství vodíku je dodaného z tlakových lahví je vypočteno u naměřených hodnot.

Po zastavení tlakových lahví se ponechaly zapnuté elektrolyzéry, které dodávaly dál do metal-hydridového zásobníku vodík, a to po dobu 1h a 30min. Po této době již tlak systému opět vzrostl na maximální hodnotu a metal-hydridový zásobník přestal přijímat vodík.

Množství elektrické energie, spotřebované na naplnění tlakových lahví potřebným množstvím vodíku nebylo měřeno, bude pouze teoreticky vypočítáno z naměřených spotřeb elektrolyzérů při prvním nabíjení metal-hydridového zásobníku. Stejně tak nebylo možné měřit průtok vodíku při nabíjení metal-hydridového zásobníku, tak bylo nutné množství vodíku akumulovaného v metal-hydridovém zásobníku a jeho aktuální průtok vypočítat z odečítaných hodnot poklesu tlaku.

Schéma nabíjení z tlakových lahví a elektrolyzérů

Obr. 39 – Schéma nabíjení metal-hydridového zásobníku z tlakových lahví a elektrolyzérů

Naměřené a vypočtené hodnoty

Veličina	Tlakové láhve	Elektrolyzér	Jednotky
<b>Celkový čas</b>	40	130	<b>min</b>
<b>T vody (min-max)</b>	8 - 10,1	10,1 - 12	<b>°C</b>
<b>T výstupní (min-max)</b>	9,1 - 11,2	11,2 - 13,3	<b>°C</b>
<b>T pláště (min-max)</b>	12,9 - 22,9	14,3 - 15,5	<b>°C</b>
<b>Tlak systému (min-max)</b>	13,79 - 11,17	11,17 - 13,79	<b>bar</b>
<b>Průtok vody</b>	1,9	1,9	<b>kWh</b>
<b>Spotřeba čerpadla</b>	0,001	0,00225	<b>l/min</b>
<b>Spotřeba ELC levý</b>	1,83	0,831	<b>kWh</b>
<b>Spotřeba ELC levý</b>	1,83	0,809	<b>kWh</b>
<b>Průtok vodíku (min-max)</b>	0 - 133	0,3 - 1,2	<b>l/5min</b>
<b>Množství vodíku</b>	354	150	<b>l</b>

Tab.8 – Naměřené hodnoty při 4. plnění metal-hydridového zásobníku

Množství vodíku zbylého v jedné lahvi

$$V_{ZH_2} = \frac{V_{tl}}{p_{tl\max}} \cdot p_{tl\min} = \frac{621}{13,79} \cdot 11,17 = 502 \text{ l } H_2 \quad (5.17)$$

kde:  $V_{ZH_2}$  ... zbylé množství vodíku po uzavření přívodů tlakových lahví (l),  
 $V_{tl}$  ... maximální množství vodíku v tlakové lahvi (l),  
 $p_{tl\max}$  ... maximální tlak při  $V_{tl}$ ,  
 $p_{tl\min}$  ... minimální tlak při  $V_{ZH_2}$ .



Množství vodíku dodaného ze tří lahví do zásobníku

$$V_{H_2} = (V_{tl} - V_{ZH_2}) \cdot 3 = (621 - 502) \cdot 3 = 118 \cdot 3 = 354 \text{ l } H_2 \quad (5.18)$$

kde:  $V_{H_2}$  ... množství dodaného vodíku z tlakových lahví (l),  
 $V_{tl}$  ... maximální množství vodíku v tlakové láhvi (l).

Spotřeba elektrické energie při plnění tlakových lahví z elektrolyzérů

Vychází ze spotřeb elektrolyzérů při 1. nabíjení metal-hydridového zásobníku, protože přímo spotřeby při tomto způsobu plnění nebyly zaznamenávány. Základem je spotřeba elektrické energie pro výrobu 100 l vodíku. V tomto případě uvažujeme spotřebu stejnou u obou elektrolyzérů.

$$E_{354} = \frac{V_{H_2} \cdot E_{100}}{V_{100}} = \frac{354 \cdot 0,517}{100} = 1,83 \text{ kWh} \quad (5.19)$$

kde:  $E_{354}$  ... spotřeba elektrické energie na výrobu 354 l vodíku (kWh),  
 $V_{H_2}$  ... množství dodaného vodíku do tlakových lahví (l),  
 $E_{100}$  ... spotřeba elektrické energie na výrobu 100 l vodíku (kWh),  
 $V_{100}$  ... množství vodíku vyrobeného se spotřebou  $E_{100}$  (l).

Celková spotřeba elektrické energie při plnění zásobníku z tlakových lahví a elektrolyzérů

$$\begin{aligned} E_{s(4)} &= E_{\check{c}(4)} + 2 \cdot E_{354(4)} + E_{ELC1(4)} + E_{ELC2(4)} \\ E_{s(4)} &= 0,00325 + 2 \cdot 1,83 + 0,831 + 0,809 \\ E_{s(4)} &= 5,303 \text{ kWh} \end{aligned} \quad (5.20)$$

kde:  $E_{s(4)}$  ... celková spotřeba elektrické energie při plnění zásobníku (kWh),  
 $E_{\check{c}(4)}$  ... celková spotřeba oběhového čerpadla za celou dobu plnění (kWh),  
 $E_{354(4)}$  ... celková teoretická spotřeba elektrolyzérů při plnění tlakových lahví (kWh),  
 $E_{ELC1(4)}$  ... spotřeba 1. elektrolyzérů při plnění bez tlakových lahví (kWh),  
 $E_{ELC2(4)}$  ... spotřeba 2. elektrolyzérů při plnění bez tlakových lahví (kWh).

Grafické závislosti ze 4. nabíjení metal-hydridového zásobníku jsou zobrazeny v Příloze č.12, Příloze č.13 a Příloze č.14.

#### 5.4.9 4. vybíjení metal-hydridového zásobníku do palivového článku NEXA

Jedná se o poslední měření, které na metal-hydridovém zásobníku probíhalo. V tomto případě již bylo metal-hydridovému zásobníku dodáno teplo zvýšením teploty chladicí vody z 12 °C na 30,5°C. Ohřev probíhal pouze zkušebně, nebyl vytvořen žádný nezávislý uzavřený okruh pro dodání tepla metal-hydridovému zásobníku. Voda v nádrži byla ohřata pomocí kovové spirály, přičemž množství ohřívání vody bylo 50 l studené vody o teplotě 10 °C. Hodnota spotřebované elektrické energie nebyla měřena, je tudíž vypočtena v naměřených a vypočtených hodnotách. Tímto byl vyřešen ohřev metal-hydridového zásobníku.

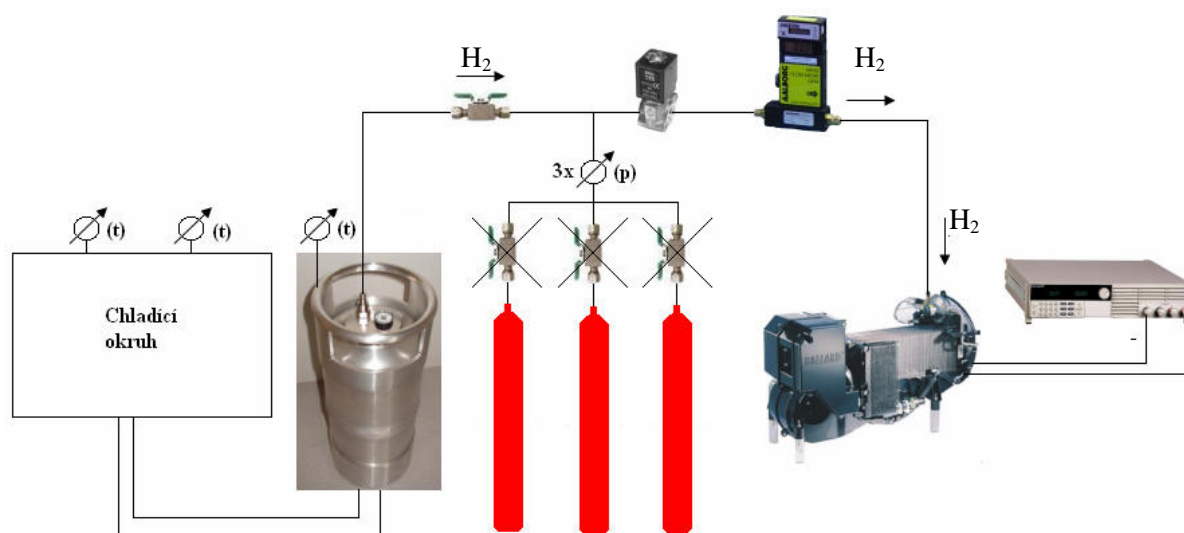
Jakmile se spustil okruh pro ohřev metal-hydridového zásobníku, začal v něm také růst tlak. Ve chvíli, kdy se podle barometru, který určuje tlak přímo v zásobníku, dostal na hodnotu 15 bar, byla optimální teplota vody dodávající teplo právě 30,5 °C. Hodnota tlaku systému byla odečítána z barometrů na tlakových lahvích. V tu chvíli se spustilo vybíjení metal-hydridového zásobníku do palivového článku. Výkon stejnosměrné zátěže byl nastaven na 1000 W.

Veličiny byly měřeny první tři minuty po 15 sekundách, následně dalších 5 minut bylo zaznamenáváno po 30 sekundách a zbytek celého měření už po 1 minutě.

Hlavní měřené veličiny byly:

- |                     |   |
|---------------------|---|
| - Doba měření,      | - Proud stacku,                         |
| - Množství vodíku,  | - Teplota stacku,                       |
| - Tlak systému,     | - Teplota vody v nádrži,                |
| - Výkon,            | - Teplota na výstupu chladicího okruhu, |
| - Vlastní spotřeba, | - Teplota metal-hydridového zásobníku,  |
| - Napětí stacku.    |   |

#### Schéma zapojení pro 4. vybíjení



Obr. 40 – Schéma zapojení 4. vybíjení do palivového článku

Naměřené a vypočtené hodnoty

Veličina	Hodnota	Jednotky
Doba měření	40	min
Množství H <sub>2</sub>	500	l
Tlak systému	15 - 1,8	bar
Výkon	1000	W
Průměrná vlastní spotřeba	183	W
Průměrný průtok vodíku	14,5	l/min
Průměrné napětí stacku	31,36	V
Průměrný proud stacku	39,08	A
Průměrná teplota stacku	25,9 - 66,9	°C
Teplota vody v nádrži	30,5 - 28,5	°C
Teplota výstupu zásobníku	29,9 - 26,1	°C
Teplota zásobníku	27 - 23,1	°C

Tab. 9 – Naměřené hodnoty při 4. vybíjení zásobníku do palivového článku

Spotřebovaná energie pro ohřátí vody v chladícím okruhu

$$E_{oh(4)} = m_{(4)} \cdot c \cdot (t_{2(4)} - t_{1(4)}) = 50 \cdot 4,184 \cdot (30,5 - 12) = 3870 \text{ kJ} \quad (5.21)$$

$$E_{oh(4)} = 3870 \text{ kJ} \Rightarrow 3870000 \text{ Ws} \Rightarrow 1075 \text{ Wh} \Rightarrow \underline{1,075 \text{ kWh}}$$

kde:  $E_{oh(4)}$  ... energie spotřebovaná pro ohřev vody (kWh),  
 $m_{(4)}$  ... hmotnost ohřáté vody v chladícím okruhu (kg),  
 $c$  ... měrné teplo vody ( $4,184 \text{ J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ )  
 $t_{2(4)}$  ... teplota ohřáté vody (°C),  
 $t_{1(4)}$  ... teplota ohřívání vody (°C).

Dodaná energie z palivového článku za dobu měření

Tato energie byla vypočítána z průměrné hodnoty výkonu, který palivový článek dodával po dobu měření do zátěže. Výkon byl vypočítán ze všech naměřených vzorků, zaznamenaných v programu LabView (bez vlastní spotřeby palivového článku).

$$E_{v(4)} = P_{d(4)} \cdot t_{v(4)} = 1020,641 \cdot 0,595 = 607,281 \Rightarrow 0,607 \text{ kWh} \quad (5.22)$$

kde:  $E_{v(2)}$  ... energie vyrobená palivovým článkem při 4. vybíjení (kWh),  
 $P_{d(2)}$  ... průměrná hodnota výkonu ze všech naměřených vzorků (W),  
 $t_{v(2)}$  ... doba měření (h).

Účinnost celého 4. procesu nabíjení / vybíjení

$$\eta_{(4)} = \frac{E_{v(4)}}{E_{c(4)} + E_{oh(4)} + E_{\varepsilon(4)}} = \frac{0,607}{5,303 + 1,075 + 0,001} = 0,0951 \quad (5.23)$$

$$\eta_{(4)\%} = \eta_{(4)} \cdot 100 = 9,51 \% \quad (5.24)$$

kde:  $\eta_{(4)}$  ... účinnost celého procesu (-),  
 $E_{v(4)}$  ... energie vyrobená při vybíjení (kWh),  
 $E_{c(4)}$  ... energie spotřebovaná při 4. nabíjení z elektrolyzérů (kWh),  
 $\eta_{(4)\%}$  ... účinnost celého procesu (%).

Výpočet účinností jednotlivých zařízení

Celková účinnost je složena s účinnosti elektrolyzérů, palivového článku a uložení vodíku v metal-hydridovém zásobníku. Při výpočtu účinnosti elektrolyzérů a palivového článku vycházíme z ekvivalentního množství energie ve vodíku (5.25). Účinnost metal-hydridového zásobníku je dopočítána z celkové účinnosti celého procesu nabíjení / vybíjení v poměru s účinnostmi elektrolyzérů a palivového článku.

Ekvivalentní množství energie ve vodíku při 4. nabíjení / vybíjení

$$E_{H2(4)} = \frac{V_{H2(4)}}{V_{molH2(4)}} \cdot Q_t \cdot U_{ROV} = \frac{500}{22,414} \cdot 53,596 \cdot 1,23 = 1471 \text{ Wh} \Rightarrow 1,471 \text{ kWh} \quad (5.25)$$

kde:  $E_{H2(4)}$  ... ekvivalentní množství energie ve vodíku při 2 nabíjení/vybíjení (kWh),  
 $V_{H2(4)}$  ... množství vyrobeného vodíku (l),  
 $Q_t$  ... velikost elektrického náboje potřebného pro výrobu 1 molu vodíku (A.h),  
 $U_{ROV}$  ... rovnovážné napětí chemické reakce probíhající v elektrolyzérů (V),  
 $V_{molH2(4)}$  ... objem 1 molu vodíku (l).

Účinnost elektrolyzérů

$$\eta_{ELC(4)} = \frac{E_{H2(4)}}{E_{s(4)}} = \frac{1,471}{5,303} = 0,277 \Rightarrow \eta_{ELC(2)\%} = \eta_{ELC(2)} \cdot 100 = 27,7 \% \quad (5.26)$$

kde:  $\eta_{ELC(2)}$  ... celková účinnost elektrolyzérů při 2. procesu nabíjení / vybíjení (-),  
 $E_{H2(2)}$  ... ekvivalentní množství energie ve vodíku (kWh),  
 $E_{s(2)}$  ... elektrická energie spotřebovaná elektrolyzéry při 2. nabíjení (kWh),  
 $\eta_{ELC(2)\%}$  ... celková účinnost elektrolyzérů při 2. procesu nabíjení / vybíjení (%).

Účinnost palivového článku

$$\eta_{FC(4)} = \frac{E_{v(4)}}{E_{H2(4)}} = \frac{0,607}{1,471} = 0,413 \Rightarrow \eta_{FC(2)\%} = \eta_{FC(2)} \cdot 100 = 41,3 \% \quad (5.27)$$

kde:  $\eta_{FC(2)}$  ... celková účinnost elektrolyzérů při 2. procesu nabíjení / vybíjení (-),  
 $E_{H2(2)}$  ... ekvivalentní množství energie ve vodíku (kWh),  
 $E_{v(2)}$  ... elektrická energie spotřebovaná elektrolyzéry při 2. nabíjení (kWh),  
 $\eta_{FC(2)\%}$  ... celková účinnost elektrolyzérů při 2. procesu nabíjení / vybíjení (%).

Účinnost metal-hydridového zásobníku

$$\eta_{M-H} = \frac{\eta_{(4)}}{\eta_{ELC(4)} \cdot \eta_{FC(4)}} = \frac{0,0915}{0,277 \cdot 0,413} = 0,831 \quad (5.28)$$

$$\eta_{M-H\%} = \eta_{M-H} \cdot 100 = 83,1 \% \quad (5.29)$$

kde:  $\eta_{M-H}$  ... účinnost metal-hydridového zásobníku (-),  
 $\eta_{(4)}$  ... účinnost celého 2. procesu nabíjení / vybíjení (-),  
 $\eta_{ELC(4)}$  ... účinnost elektrolyzérů (-),  
 $\eta_{FC(4)}$  ... účinnost palivového článku (-),  
 $\eta_{M-H(4)\%}$  ... účinnost metal-hydridového zásobníku (%).

Účinnost metal-hydridového zásobníku je nižší, oproti účinnosti z 2. procesu nabíjení/vybíjení, z důvodu potřeby dodat metal-hydridovému zásobníku teplo v podobě ohřáté vody. Grafické průběhy ze 4. vybíjení metal-hydridového zásobníku jsou v Příloha č.15 a Příloha č.16.

## **6 Multikriteriální analýza**

Pro posouzení efektivnosti různých způsobů ukládání vodíku a vhodnosti jednotlivých způsobů akumulace elektrické energie získané z obnovitelných zdrojů, je výhodné použít metody multikriteriální analýzy.

### **6.1 Teorie multikriteriální analýzy**

Multikriteriální analýza je založena na matematickém modelování, přičemž pro jednodušší porovnávání lze využít pouze jednoduché matematické operace.

Jedná se v podstatě o výběr jedné varianty z několika dalších možností, které pro danou problematiku připadají v úvahu, a to vše na základě společných kritérií. Seznam kritérií nepřímo formuluje cíl multikriteriální analýzy. Vedle seznamu variant musí být k dispozici také seznam navrhovaných variant, který může být zadán explicitně, jako výčet konečného počtu možností, nebo implicitně specifikací podmínek, které musí daná varianta splňovat, aby byla považována za přípustnou. Nelze se však vyhnout subjektivním vlivům na rozhodování, jako může být zjišťování názoru expertů či zadavatele úlohy. V seznamu kritérií i variant je nutné uvážit, jakou formu by mělo mít konečné rozhodnutí. Je-li podmínkou skutečně vybrat jedinou optimální variantu, měli bychom si připustit, že v typických případech chceme z nespolehlivých a nedostatečných informací zjistit něco, co v nich obsaženo vůbec není. Zvláštním příkladem takto formulované úlohy je požadavek seřazení navrhovaných variant podle pořadí v souladu s tím, jak se přibližují k jedné optimální variantě. [40]

#### Multikriteriální metody vyhodnocení

- Metoda váženého součtu (WSA – Weighted Sum Approach)
- Metoda ideálních bodů (IPA – Ideal Points Analysis)
- Metoda TOPSIS (Technique for Order Preference by Similitary to Ideal Solution)
- Metoda shody a neshody (CDA – Concordance Discordance Analysis)
- Metoda PROMETHEE
- Metoda AGREPREF

K posouzení a výběru optimální varianty je potřeba pro každému kritériu, které jsou pro všechny alternativy stejné, určit jeho váhu.

#### Metody určování vah kritérií

- Metoda odhadu
- Metoda pořadí
- Bodovací metoda
- Fullerova metoda
- Saatyho metoda
- Metoda geometrického průměru řádků

V mém případě, kdy posuzuji optimální varianty pro uskladnění vodíku a pro akumulaci obnovitelné energie, budu používat k určení vah kritérií Saatyho metodu a vyhodnocení optimální varianty bude určené pomocí dvou metod, a to TOPSIS a WSA. Dvě metody z důvodu jasnějšího porovnání.

### 6.1.1 Saatyho metoda

Neboli také kvantitativní párové porovnávání patří mezi nejčastěji používané metody určené k volbě vah. V tomto případě se srovnávají vždy páry kritérií a hodnocení se ukládá to tzv. Saatyho matice  $S=(s_{ij})$  podle následujícího systému:

$$(s_{ij}) = \begin{cases} 1 & - i \text{ a } j \text{ jsou rovnocenná} \\ 3 & - i \text{ je slabě preferováno před } j \\ 5 & - i \text{ je silně preferováno před } j \\ 7 & - i \text{ je velmi silně preferováno před } j \\ 9 & - i \text{ je absolutně preferováno před } j \end{cases}$$

Hodnoty 2, 4, 6 a 8 jsou ponechány pro hodnocení mezistupňů. Samozřejmostí je  $s_{ii}=1$ , protože kritérium je rovnocenné samo sobě. Musí platit  $s_{ji}=1/s_{ij}$  pro všechna  $i$ . Hodnota  $s_{ij}$  tedy představuje přibližný poměr vah kritéria  $i$  a  $j$ . [41]

### 6.1.2 Metoda WSA

Metoda váženého součtu vychází z principu maximalizace užitku, přičemž má určité zjednodušení v podobě lineární funkce užitku. Vycházíme zde z kritériální matice  $Y=(y_{ij})$ , která je složena ze sloupců  $f$ , ty představují jednotlivá kritéria a z řádků  $a$ , které představují hodnocené varianty.[42]

$$Y = \begin{matrix} & \begin{matrix} f_1 & f_2 & \cdots & f_j \end{matrix} \\ \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_i \end{matrix} & \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \cdots & y_{1j} \\ y_{21} & y_{22} & \cdots & y_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{i1} & y_{i2} & \cdots & y_{ij} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (6.1)$$

Z kritériální matice se následně vytvoří normalizovaná kritériální matice  $R=(r_{ij})$ , a to za pomoci transformačních vzorců (6.2) (6.3), které lineárně transformují kritériální hodnoty na [42]

$$\text{- maximalizační kritérium: } r_{ij} = \frac{Y_{ij} - D_j}{H_j - D_j} \quad (6.2)$$

$$\text{- minimalizační kritérium } r_{ij} = \frac{H_j - Y_{ij}}{H_j - D_j} \quad (6.3)$$



kde:  $D_j$  ... minimální hodnota kritéria ve sloupci  $j$ ,  
 $H_j$  ... maximální hodnota kritéria ve sloupci  $j$ .

Za pomoci těchto transformačních vzorců (6.2) (6.3) a normalizované matice  $Y=(y_{ij})$  dostáváme normalizovanou kritériální matici  $R=(r_{ij})$  [42]:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1j} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2j} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{i1} & r_{i2} & \cdots & r_{ij} \end{bmatrix} \quad (6.4)$$

Nyní máme normalizovanou kritériální matici, ze které můžeme hodnotu potřebného užitku  $u(a_i)$  pro každou variantu  $a_i$ . K tomu potřebujeme ještě již dříve vypočítané váhy jednotlivých kritérií  $v_j$ . Jako nejlepší varianta pak vyjde ta, která dosáhne maximální hodnoty.[42]

$$u(a_i) = \sum_{j=1}^k v_j \cdot r_{ij}, \quad (6.5)$$

kde:  $v_j$  ... váha kritéria

### 6.1.3 Metoda TOPSIS

V této metodě se jedná o princip minimalizace vzdálenosti od ideální varianty, kterou je varianta, jejíž všechny hodnoty kritérií dosahují nejlepších hodnot. Jako nejlepší varianta je určena ta, která se blíží ideální variantě a zároveň je nejdál od tzv. varianty bazální, což znamená nejhorší.

Nejprve se konstruuje normalizovaná kritériální matice, vycházející stejně jako u metody WSA z kritériální matice  $Y=(y_{ij})$ , s označením  $R=(r_{ij})$ . Výpočet normalizovaných hodnot v této matici vychází právě z matice kritériální, a je [42]:

$$r_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^p (y_{ij})^2}} \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, p, \quad ; \quad j = 1, 2, \dots, k \quad (6.6)$$

Z těchto vypočítaných hodnot se sestaví právě normalizovaná kritériální matice  $R$ , stejně jako u metody WSA a z této matice se vypočítá vážená kritériální matice  $W$ , a to tak, že každý sloupec normalizované matice  $R$  násobí odpovídající vahou kritéria  $v_j$ . [42]

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1k} \\ w_{21} & w_{22} & \cdots & w_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{p1} & w_{p2} & \cdots & w_{pk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 r_{11} & v_2 r_{12} & \cdots & v_k r_{1k} \\ v_1 r_{21} & v_2 r_{22} & \cdots & v_k r_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ v_1 r_{p1} & v_2 r_{p2} & \cdots & v_k r_{pk} \end{bmatrix} \quad (6.7)$$

Po zjištění vážené kritériální matice se určí nejlepší varianta ( $H_1, H_2, \dots, H_k$ ) a bazální varianta ( $D_1, D_2, \dots, D_k$ ) vzhledem k hodnotám ve vážené kritériální matici. Platí, že  $H_j = \max_i(w_{ij})$  a  $D_j = \min_i(w_{ij})$ . Další krok výpočtu spočívá ve zjištění vzdálenosti variant od varianty ideální, kterou značíme  $d_i^+$  a vzdálenosti variant od varianty bazální, kterou značíme  $d_i^-$ : [42]

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^k (w_{ij} - H_j)^2} \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (6.8)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^k (w_{ij} - D_j)^2} \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (6.9)$$

V obou případech je použita Euklidova míra vzdálenosti [42], která je základním ukazatelem metriky. Metrika je matematická struktura, pomocí které lze formálním způsobem definovat pojem vzdálenosti. [43] Následuje výpočet relativního ukazatele vzdálenosti variant od varianty bazální [42]:

$$c_i = \frac{d_i^+}{d_i^+ - d_i^-} \quad ; \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (6.10)$$

$$\text{kde pro } c_i \text{ platí: } \begin{cases} 0 \leq c_i \leq 1 \\ c_i = 0 \Leftrightarrow a_i \approx (D_1, D_2, \dots, D_k) \\ c_i = 1 \Leftrightarrow a_i \approx (H_1, H_2, \dots, H_k) \end{cases}$$

Varianty se nakonec výpočtu seřadí podle klesajících hodnot ukazatele  $c_i$ , čímž získáme úplné uspořádání všech variant. [42]

#### 6.1.4 Výběr optimální varianty pro uskladnění vodíku

Při výběru nejvhodnějšího způsobu uskladnění vodíku jsem vycházel ze tří variant, kterými byly uložení do tlakových lahví, do kapalného vodíku a do metal-hydridového zásobníku. Těmto třem variantám jsem přiřadil pět kritérií, podle kterých jsem se na základě multikritériální analýzy rozhodoval. Celé řešení kritériálních matic, normalizovaných kritériálních matic, vážených matic i výpočet vah kritérií, byl prováděn v softwaru MCA7 a MCA8, takže výpočet je zobrazen pouze teoreticky v předchozí kapitole 6.1. Zobrazení a popis variant a kritérií je v Tab.10.

Varianty\Kritéria	Energetická náročnost skladování	Teplota	Objemová hustota	Hmotnostní kapacita	Tlak
	(MJ/kg)	(°C)	(kg/m <sup>3</sup> )	(%)	(bar)
<b>Tlakové láhve</b>	47 [44]	20 [45]	39 [45]	13 [46]	700 [45]
<b>Kapalný vodík</b>	50,7 [44]	-253 [45]	71,08 [45]	2 [46]	5 [45]
<b>Metal-hydrid</b>	15 [44]	20 [45]	117 [45]	1,4 [45]	20 [45]

Tab. 10 – Zobrazení navrhovaných variant a kritérií pro uložení vodíku

**Popis jednotlivých kritérií**

Energetická náročnost skladování: pro tlakové nádoby vycházíme z množství energie potřebné pro stlačení 1 kg plynu na tlak 700 bar; pro kapalný vodík obsahuje energii potřebnou pro ochlazení plynu na teplotu - 253 °C, energie odpaření a zahřívání; pro metal-hydridy stlačení vodíku na dostačující tlak k plnění 20 bar a energii potřebnou pro chlazení metal-hydridového zásobníku. [44]

Teplota: potřebná teplota všechny tři varianty uložení vodíku

Objemová hustota: poměr hmotnosti vodíku ku hmotnosti systému

Hmotnostní kapacita: poměr hmotnosti vodíku k hmotnosti celého skladovacího systému

Tlak: tlak potřebný při ukládání vodíku pro každou variantu

**Výpočet vah jednotlivých kritérií**

Jak jsem již zmínil, váhy pro jednotlivá kritéria jsem počítal Saatyho metodou pomocí programu MCA7. K jejich zjištění bylo zapotřebí, abych určil jejich vzájemnou důležitost přiřazením jednotlivé důležitosti pro každé kritérium:

- energetická náročnost skladování 8
- teplota 3
- objemová hustota 7
- hmotnostní kapacita 7
- tlak 4

což následně dalo vzniknout matici párových porovnání, tzv. Saatyho matici (viz. Tab. 11)

Kritéria	Energetická náročnost skladování	Teplota	Objemová hustota	Hmotnostní kapacita	Tlak
<b>Energetická náročnost skladování</b>	1	2,667	1,143	1,143	2
<b>Teplota</b>	0,375	1	0,429	0,429	0,750
<b>Objemová hustota</b>	0,875	2,333	1	1,167	1,750
<b>Hmotnostní kapacita</b>	0,875	2,333	0,857	1	1,750
<b>Tlak</b>	0,5	1,333	0,571	0,571	1

Tab. 11 – Saatyho matice párového porovnání pro uložení vodíku

Z této Saatyho matice se následně vypočítaly váhy jednotlivých kritérií, které jsou uvedeny v Tab. 12. Tato tabulka dále obsahuje informaci, zda je kritérium maximalizační nebo minimalizační.

Tab. 13 a 14 pak obsahují výsledná ohodnocení jednotlivých variant podle metod WSA a TOPSIS. Na základě těchto ohodnocení jsou varianty seřazeny od nejvhodnější po nejméně vhodnou.

Názvy kritérií	Energetická náročnost skladování	Teplota	Objemová hustota	Hmotnostní kapacita	Tlak
Max/Min = 1/0	0	1	0	1	0
Váhy kritérií	0,2757	0,1034	0,2490	0,2341	0,1378

Tab. 12 – Zobrazení vah kritérií s přiřazení maximalizační a minimalizační hodnoty

#### Posouzení podle metody WSA

Pořadí	Název varianty	WSA
1	Tlakové láhve	0,615
2	Metal-hydrid	0,514
3	Kapalný vodík	0,297

Tab. 13 – Výsledky dle WSA

#### Posouzení podle metody TOPSIS

Pořadí	Název varianty	TOPSIS
1	Tlakové láhve	0,554
2	Metal-hydrid	0,512
3	Kapalný vodík	0,301

Tab. 14 – Výsledky dle TOPSIS

Z daných analýz vyplývá, že porovnáme-li tímto způsobem jednotlivé varianty, je nejvhodnější skladovat vodík v tlakových lahvích. Skladování v metal-hydridových zásobnících vychází jako horší varianta, hlavně z důvodu velké objemové hustoty a u kapalného vodíku, který je na tom „nejhůř“, je hlavním důvodem nízká teplota při jeho zpracování a energetická náročnost.

Jak již bylo ale popsáno v kapitole o skladování vodíku, každý způsob se najde své využití i přes zde vypsane nevýhody. Tlakové láhve jsou dnes i přes docela náročný proces stlačení vodíku na požadovaný tlak stále nejvyužívanější, kapalný vodík našel své uplatnění hlavně v kosmonautice, kde se používá jako palivo pro vesmírné rakety a metal-hydridy jsou stále předmětem zdokonalování, kdy do budoucna se s nimi počítá např. jako se zásobníky vodíku v mobilních aplikacích, protože co do své velikosti pojmu větší množství vodíku, než právě tlakové láhve. Avšak na úkor celkové hmotnosti systému, která je u metal-hydridů několikanásobně vyšší.

#### 6.1.5 Výběr optimální varianty pro akumulaci elektrické energie

Při srovnávání různých variant akumulace elektrické energie je potřeba, stejně jako u hledání optimální možnosti na uskladnění vodíku, najít srovnatelné varianty a určit si k nim jednotlivá kritéria, podle kterých se mají vyhodnocovat.

V tomto případě byly mnou zvoleny čtyři varianty akumulace elektrické energie a hodnocení probíhalo podle pěti kritérií. Varianty byly vybrány tak, aby přibližně odpovídaly vzájemně svým možnostem využití. Vodíkový systém je jednou z alternativ a v tomto případě je vztažen na ukládání vodíku v laboratoři VŠB-TUO do metal-hydridového zásobníku. Hodnoty potřebné pro daná kritéria byly teoreticky dopočítány z experimentálního měření z Kap.5.3.

Výpočet opět probíhal v programech MCA7 a MCA8, konkrétně v MCA7 bylo nutné spočítat váhy kritérií a v MCA8 se prováděl konečný výpočet ke zjištění optimální varianty. V Tab.15 jsou rozepsány varianty a k nim přiřazené jednotlivé kritéria s hodnotami.

Varianty\Kritéria	Doba vybíjení	Účinnost	Životnost	Hustota energie	Cena
	(s)	(%)	(cykly)	(Wh.kg <sup>-1</sup> )	(Kč.kWh <sup>-1</sup> )
<b>Průtoková baterie</b>	36000 [47]	80 [47]	12000 [47]	25 [51]	5000 [47]
<b>Olověná baterie</b>	18000 [47]	90 [48]	1000 [49]	40 [51]	1815 [48]
<b>Superkapacitory</b>	10 [49]	95 [47]	1000000 [49]	10 [49]	2125 [48]
<b>Vodíkový systém</b>	20000	10	10000 [51]	26	360000

Tab. 15 – Zobrazení navrhovaných variant a kritérií pro akumulaci

Pro hodnoty vodíkového systému byly využity hodnoty naměřené při nabíjení a vybíjení metal-hydridového zásobníku. Doba vybíjení je vypočítaná za předpokladu nižšího zatížení palivového článku a plného nabití metal-hydridového zásobníku vodíkem. Účinnost je vypočtena v Kap.5. Hustota energie je vypočtena z vyrobené elektrické energie při plném nabití metal-hydridového zásobníku a vztažena na celkovou hmotnost využitých zařízení – elektrolyzérů, palivového článku a metal-hydridového zásobníku. Cena je spočítána z celkové ceny elektrolyzérů, palivového článku a metal-hydridového zásobníku a vztažena na jednotku elektrické energie. Životnost vodíkového systému nezahrnuje životnost palivového článku, která je pouhých 1500 h, protože ta se vztahuje pouze na nutnost vyměnit po takové době provozu ionto-měničovou membránu, takže po její výměně pracuje palivový článek dál. Dopočítané hodnoty jsou na následující straně.

#### Výpočet parametrů vodíkového systému

	Cena	Hmotnost
	(tis. Kč)	(kg)
<b>Elektrolyzér</b>	230	23
<b>Palivový článek</b>	150	13
<b>Metal-hydrid</b>	45	12
<b>Celkem</b>	<b>655</b>	<b>71</b>

Tab. 16 – Ceny a hmotnosti jednotlivých zařízení

Výpočet celkové ceny i váhy je proveden pro dva elektrolyzéry, jeden palivový článek a jeden metal-hydridový zásobník. Dále bylo potřeba dopočítat teoretickou vyrobenou energii, kdyby byl metal-hydridový zásobník naplněn na svou plnou kapacitu 1500 l vodíku:

$$E_{teo} = \frac{V_{1500}}{V_{500}} \cdot E_{v(4)} = \frac{1500}{500} \cdot 0,607 = 1,821 \text{ kWh} \quad (6.11)$$

kde:  $E_{teo}$  ... teoretická energie vyrobená z 1500 l vodíku (kWh),  
 $V_{1500}$  ... objem plného metal-hydridového zásobníku (l),  
 $V_{500}$  ... skutečný množství vodíku ze 4. nabíjení v metal-hydridovém zásobníku (l),  
 $E_{v(4)}$  ... energie vyrobená při 4. vybíjení z 500 l vodíku (kWh).

K této hodnotě se mohly vztáhnout celková váha systému i jeho celková cena:

$$\text{Hustota energie} \Rightarrow \frac{E_{teo}}{m_c} \cdot 1000 = \frac{1,821}{71} \cdot 1000 = 26 \text{ Wh.kg}^{-1} \quad (6.12)$$

$$\text{Cena} \Rightarrow \frac{N_i}{E_{teo}} = \frac{655000}{1,821} = 360000 \text{ Kč.kWh}^{-1} \quad (6.13)$$

kde:  $E_{teo}$  ... teoretická energie vyrobená z 1500 l vodíku (kWh)  
 $m_c$  ... celková hmotnost zařízení vodíkového systému (kg)  
 $N_i$  ... pořizovací náklady na zařízení pro vodíkový systém (Kč)

### Výpočet vah jednotlivých kritérií

Pomocí programu MCA7 bylo zapotřebí z Tab.15 přiřadit jednotlivým kritériím váhy. Ty se počítaly párováním důležitostí jednotlivých kritérií. Každému kritériu jsem přiřadil jeho důležitost dle vlastního uvážení přiřazením číselné hodnoty ze stupnice 1-9:

- doba vybíjení 5
- účinnost 8
- životnost 4
- hustota energie 7
- cena 8

Z těchto hodnot vznikla kritériální matice potřebná pro určení vah jednotlivých kritérií, která se nazývá Saatyho matice párových porovnání:

Kritéria	Doba vybíjení	Účinnost	Životnost	Hustota energie	Cena
Doba vybíjení	1	0,625	1,25	0,714	0,625
Účinnost	1,6	1	2	1	1
Životnost	0,8	0,5	1	0,571	0,5
Hustota energie	1,4	1	1,75	1	0,875
Cena	1,6	1	2	1,43	1

Tab. 17 – Saatyho matice párových porovnání pro akumulaci

Z této tabulky, resp. Saatyho matice párových porovnání, vypočítal program MCA7 hodnoty vah pro jednotlivá kritéria, přičemž bylo potřeba opět rozlišit kritérium maximalizační a minimalizační (0 pro minimalizační, 1 pro maximalizační):

Názvy kritérií	Doba vybíjení	Účinnost	Životnost	Hustota energie	Cena
Max/Min = 1/0	1	1	1	1	0
Váhy kritérií	0,1563	0,2437	0,1250	0,2249	0,2510

Tab. 18 – Zobrazení vah kritérií v přiřazením maximalizační a minimalizační hodnoty

Pomocí metod WSA a TOPSIS, implementovaných do programu MCA8, byla následně vypočítána pořadí hodnocených variant akumulace elektrické energie, což je zobrazeno v Tab. 19 a 20.

#### Výsledky dle WSA

Pořadí	Název varianty	WSA
1	Olověná baterie	0,782
2	Průtoková baterie	0,743
3	Superkapacitory	0,618
4	Vodíkový systém	0,301

Tab. 19 – Výsledky dle WSA

#### Výsledky dle TOPSIS

Pořadí	Název varianty	TOPSIS
1	Olověná baterie	0,640
2	Průtoková baterie	0,633
3	Superkapacitory	0,550
4	Vodíkový systém	0,391

Tab. 20 – Výsledky dle TOPSIS

Z uvedených tabulek odpovídá hodnota nejvyužívanějšího systému realitě, protože olověné baterie jsou dnes skutečně nejpoužívanější zařízení k akumulaci elektrické energie. O něco málo horší varianta se jeví průtokové baterie (z ang. flow batteries), jejichž nevýhodou oproti olověným bateriím je vyšší cena, avšak jsou oproti nim „novinkou“, která své místo na trhu s akumulací elektrické energie určitě najde. Superkapacitory mají jsou na třetím místě, hlavně z důvodu jejich krátkého času vybíjení a hustoty energie. Vodíkový systém vychází nejhůř, což způsobuje jeho mnohonásobně vyšší cena, oproti ostatním posuzovaným variantám a jeho nízká účinnost, spojená s účinnostmi jednotlivých zařízení potřebných v tomto procesu. Stejně tak je to i s cenou, je zapotřebí více zařízení, s větší technologickou náročností, oproti všem zbylým variantám.

## ***Zhodnocení měření a multikriteriálních analýz***

Při experimentálním měření nabíjení a vybíjení metal-hydridového zásobníku, což bylo vlastně hlavním zaměřením mé diplomové práce, se mělo podařit úplné nabití metal-hydridového zásobníku. Jenže to se nezdařilo. Jak je uvedeno v Kap. 5 ve všech provedených měřeních, kdy nebylo možné soustavné nabíjení zásobníku tlakem 15 bar. Proto se zkoušel nabíjet dvakrát ze dvou paralelně pracujících elektrolyzérů, čímž se podařilo za cca 5 hodin naplnit zásobník pouze na 400 l vodíku a při dalších dvou měřeních se zásobník připojil k tlakovým lahvím, ve kterých byl tlak cca 15 bar. Při tomto pokusu se podařilo sice zásobník naplnit 500 l vodíku, což není taková změna oproti nabíjení z elektrolyzérů, ale za to ve výrazně kratším čase. I přes kratší čas, však byla výsledná účinnost nižší, protože tlakové láhve bylo potřeba vodíkem naplnit, což se taktéž provádělo z elektrolyzérů a do výsledné účinnosti je tak započítána i spotřeba elektrolyzérů při plnění tlakových lahví. Množství vodíku, které se však podařilo uskladnit tímto způsobem v zásobníku, dosahovalo nejvyšších hodnot v krátkém čase nabíjení, snížilo se až při poklesu tlaku v systému. Z toho se dá tedy jednoznačně říct, že naplnění metal-hydridového zásobníku na jeho plnou kapacitu je podmíněno stálým tlakem 15 bar.

Jelikož jsem se ve své práci zabýval jak různými způsoby akumulace elektrické energie, tak i způsoby uložení vodíku, tak jsem pomocí multikriteriální analýzy srovnal tři možnosti uložení vodíku. Uložení do tlakových lahví, do již zmíněných metal-hydridů a ve formě kapalného vodíku. Výsledky analýzy odpovídají realitě. Jako nejvhodnější metoda vychází uložení vodíku v tlakových lahvích, což je dnes taky nejpoužívanější metoda. Za ní následuje ukládání vodíku do metal-hydridových zásobníků, což je novější a stále zdokonalovaná technologie, která určitě své využití najde hlavně v mobilních aplikacích. Kapalný vodík má výhodu v menších objemech, oproti vodíku plynnému, avšak jeho využívání v mobilních aplikacích není vhodné hlavně kvůli jeho nízké teplotě. Své uplatnění však také našel, a to hlavně v kosmickém programu jako palivo pro vesmírné rakety

V posledním bodě jsem provedl pomocí multikriteriální analýzy srovnání čtyř různých způsobů akumulace obnovitelné energie. Akumulaci elektrické energie do vodíku jsem srovnával s akumulací do olověných baterií, do baterií flow a do superkapacitorů. Systém akumulace do vodíku se vztahuje k výsledku mého měření při nabíjení metal-hydridového zásobníku, tudíž k akumulaci elektrické energie v laboratoři VŠB-TUO do vodíku za použití metal-hydridového zásobníku. Výsledky vodíkové akumulace elektrické energie dopadly, dle očekávání, jako nejhorší možnost. Hlavním důvodem je pro tento výsledek v dnešní době stále vysoká cena zařízení potřebných pro tento způsob ukládání elektrické energie. Nejlepší vycházely baterie olověné, které se také dneska využívají nejvíce. Slušně konkurovat jim v budoucnu mohou průtokové (flow) baterie, které jsou dnes stále ve vývoji a od olověných se liší hlavně výrazně vyšší cenou.



## **Závěr**

I když se podle zhodnocení měření a multikriteriálních analýz může zdát vodík jako možnost nejhorší a neperspektivní, není tomu tak. Vodík jako dostupné palivo má obrovskou výhodu před ostatními palivy – nachází se na Zemi ve velkém množství, zejména v mnoha sloučeninách a lze ho považovat za nevyčerpatelný zdroj energie. Je potřeba pouze další technologický vývoj, aby došlo ke snížení nákladů potřebných k výrobě vodíku, k přeměně jeho chemické energie v energii elektrickou a uložení vodíku, se kterým také souvisí bezpečnost. V rozšíření vodíku v mobilních aplikacích také brání nedořešené vodíkové hospodářství, nebo-li infrastruktura. Perfektním příkladem využití vodíkových technologií je v Kapitole 3.9 zmíněný systém Utsira, který je schopný pracovat nezávisle a spolehlivě.

Srovnáme-li celosvětovou výrobu vodíku a ropy, tak výroba ropy je asi 120 x vyšší, než výroba vodíku. Převážnou část vyrobeného vodíku spotřebuje chemický průmysl, proto trh s vodíkem v oblasti energetiky prakticky neexistuje. Kapacity výroby vodíku s využitím obnovitelných zdrojů jsou velmi malé a rovněž chybí již zmíněná infrastruktura. Největší rozvoj, jakožto palivo, zažívá vodík v automobilovém průmyslu. I přes to, že se zatím jedná většinou o zkušební procesy a vývoje, tak se objevily např. v USA čerpací stanice na kapalný a plynný vodík do automobilů.

I když zůstává vodík jedním z nejzajímavějších nosičů energie, bude trvat ještě minimálně 10 až 20 let, než se začne ve větším měřítku využívat. V tomto směru je největší potenciál vkládán do palivových článků. Počty prodaných kusů v dnešní době jsou poměrně malé, palivový článek totiž není nejlevnější záležitost.

Z celkového pohledu lze říct, že vodíkové technologie dosáhnou největšího rozvoje pro akumulaci elektrické energie z obnovitelných zdrojů, pokud bude existovat dobře fungující vodíkové hospodářství a sníží se náklady na technologie využívající vodík.

## ***Použitá literatura***

- [1] Bartoš, V.: *Obnovitelné zdroje energií*, Grada Publishing, Praha, 2010
- [2] Cenek, M.: *Akumulátory od principu k praxi*, FCC Public
- [3] Tuček, V.: *Vodík*, Praha, 2004
- [4] Sokanský, K.: *Palivové články v energetice*, Ostrava, 2007
- [5] Chválek, R.: *Palivové články pro akumulaci elektrické energie*, diplomová práce, Ostrava, 2008
- [6] Sýkora T.: *Problematika připojování větrných elektráren do distribuční sítě* (<http://energie.tzb-info.cz/t.py?t=2&i=4279&h=206&pl=49>)
- [7] *Připojování obnovitelných zdrojů energie do elektrizační soustavy, studie ČSRES* (<http://www.csres.cz/Aktualne/Aktualne.htm>)
- [8] *Konkurence schopnost obnovitelných zdrojů energie* (<http://energie.tzb-info.cz/energeticka-politika/5751-konkurenceschopnost-obnovitelných-zdrojů-energie>)
- [9] *Slunce a jeho energie* (<http://www.tzb-info.cz/1948-slunce-a-jeho-energie>)
- [10] Houdek Vít, Bc. : *Semestrální práce z Vybraných principů elektroenergetiky*
- [11] Lybra, M.: *Hospodaření s energií*, Česká zemědělská univerzita
- [12] *Palivové články, rozdělení, princip, vlastnosti* (<http://energie.tzb-info.cz/teorie-obnovitelna-energie/6617-palivove-clanky-rozdeleni-principy-vlastnosti>)
- [13] *Energetické využití palivových článků* (<http://biom.cz/cz/odborne-clanky/energeticke-vyuziti-palivovych-clanku>)
- [14] Somolová, M., Dlouhý P. : *Výroba vodíku*, Česká vodíková technologická platforma, 2007
- [15] *Akumulace energie* (<http://elektrika.cz/terminolog/terminologitem.2005-05-26.0638199009/view?searchterm=akumulace>)
- [16] Libra M, Poulek V. : *Zdroje a využití energie*, Česká zemědělská univerzita, 2007
- [17] *Lithium-iontový akumulátor* (<http://cs.wikipedia.org/wiki/Li-ion>)
- [18] *Setrvačník* (<http://www.zive.cz/clanky/ups-na-setrvacnik--to-tu-jeste-nebylo/sc-3-a-108959/default.aspx>)
- [19] Dvořák P, FEKT VUT Brno : *Prezentace z konference Nekonenční zdroje elektrické energie*

- [20] CAES ([http://en.wikipedia.org/wiki/Compressed\\_air\\_energy\\_storage](http://en.wikipedia.org/wiki/Compressed_air_energy_storage))
- [21] Murtinger, K., Beranovský, J., Tomeš, M. : *Fotovoltaika, Elektrická energie ze slunce*, EkoWATT, Praha 2009
- [22] Kolektiv autorů. Cyklus přednášek : *Rozvoj vysokoškolského vzdělávání v oblasti obnovitelných zdrojů energie* ([rccv.vsb.cz/island/docs/fotovoltaika.pdf](http://rccv.vsb.cz/island/docs/fotovoltaika.pdf))
- [23] Rychetník, V. : *Větrné motory*, VŠB-TUO 1995
- [24] Vysloužil, M., Hradílek, Z. : *Výběr systému akumulace energie z větrných elektráren multikriteriální analýzou*, VŠB-TUO 2009
- [25] *Výkupní ceny a zelené bonusy* (<http://www.mbsystem.eu/cz/novinky/0/20/detail/28.html>)
- [26] <http://eru.cz/>
- [27] Data pro FVE na NK , VŠB-TUO
- [28] Chválek, R., Hradílek, Z. : *Výzkum akumulace energie z obnovitelných zdrojů v palivových článcích*, VŠB-TUO 2009
- [29] Gregor, J., Radil, L., Uher, J. : *Nové možnosti akumulace velkých objemů elektrické energie*. Sborník konference EPE 2008. U EEN FEKT VUT Brno. ([http://www.epe-conference.eu/epe2008/files/paperspdf/76\\_2008.pdf](http://www.epe-conference.eu/epe2008/files/paperspdf/76_2008.pdf))
- [30] VRB Power System : *Capture the wind* ([www.vrbpower.com](http://www.vrbpower.com))
- [31] *Experiences from the wind-hydrogen plant at Utsira* (<http://www.fuelcells.bham.ac.uk/documents/14Nakken.pdf>)
- [32] Shanzbaatar A.: *H Bank – Comparing hydrogen storage methods for efficient hydrogen power back up system* (<http://www.fuelcellmarkets.com/content/images/articles/16500%20Comparison.pdf>)
- [33] Metal-hydrid, materiály poskytnul Petr Moldřík
- [34] *Vodík*, Česká asociace technických plynů (<http://www.catp.cz/publikace/vodik.pdf>)
- [35] *Hydrogen Storage*, Energy Resources Division (<http://www.bnl.gov/est/erd/hydrogenStorage/>)
- [36] Data poskytnutá společností LabTech
- [37] <http://www.zpanp.cz/ventilovy-program/>

- [38] manuál k elektrolyzéru HOGEN GC600
- [39] [http://www.aalborg.com/images/file\\_to\\_download/en\\_Aalborg\\_EM201101\\_XFM](http://www.aalborg.com/images/file_to_download/en_Aalborg_EM201101_XFM)
- [40] Hradílek, Z. : *Elektroenergetika distribučních a průmyslových sítí*, 1.vyd. Ostrava VŠB-TUO: Montanex, 2008, 388 s.
- [41] *Multikriteriální analýza* (<http://jana.kalcev.cz/vyuka/kestazeni/EKO422-Vahy.pdf>)
- [42] manuál k programu MCA8
- [43] *Metrika* (<http://cs.wikipedia.org/wiki/Metrika>)
- [44] Ragheb, M.: *Hydrides alloys for hydrogen storage*, 2010  
(<https://netfiles.uiuc.edu/mragheb/www/NPRE%20498ES%20Energy%20Storage%20Systems/Metal%20Hydrides%20Alloys%20for%20Hydrogen%20Storage.pdf>)
- [45] *Strategická výzkumná agenda rozvoje vodíkového hospodářství*, 2010  
([www.hytep.cz/data/docs/SVA\\_HYTEP.pdf](http://www.hytep.cz/data/docs/SVA_HYTEP.pdf))
- [46] Zuttel A.: *Hydrogen storage methods*, 2004  
([http://lem.ch.unito.it/didattica/infochimica/Idrogeno\\_2005/documenti/Review\\_Zuettel\\_2004.pdf](http://lem.ch.unito.it/didattica/infochimica/Idrogeno_2005/documenti/Review_Zuettel_2004.pdf))
- [47] de Boer P, Raadschelders J.: *Flow batteries*, 2007  
[http://www.leonardo-energy.org/webfm\\_send/164](http://www.leonardo-energy.org/webfm_send/164)
- [48] Dwivedi B., Sahay K.: *Energy storage technology for performance enhancement of power systém* 2009, (<http://www.scribd.com/doc/3905115/Energy-Storage-Technology-for-Performance-Enhancement-of-Power-System>)
- [49] Libra M, Mareš J.: *Akumulace elektrické energie*, ZČU Praha  
(<http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/42869.pdf>)
- [50] Skoumal, M.: *Vanad redoxová průtoková baterie*  
(<http://www.scienceandtrade.com/cs/vanadaku.html>)
- [51] *Energetika – Mýty a skutečnosti* ([http://www.dejvice.cz/edison/energetické\\_myty.html](http://www.dejvice.cz/edison/energetické_myty.html))
- [52] Minařík D., Sokanský K.: *Provozní charakteristiky palivového článku typu PEM a jeho laboratorní připojení do sítě*, konference Hydrogen technologies, Fuell cells and Applications 2008
- [53] manuál k palivovému článku NEXA

## ***Seznam obrázků***

Obr.1	Struktura a fungování fotovoltaického článku
Obr.2	Charakteristická křivka proud-napětí fotovoltaického článku
Obr.3	Monokrystalický článek
Obr.4	Polykrystalický článek
Obr.5	Beaufortova stupnice
Obr.6	Gondola větrné elektrárny
Obr.7	Větrná elektrárna
Obr.8	Onshore park
Obr.9	Principiální schéma geotermální elektrárny
Obr.10	Principální schéma odběru nízkopotenciálního tepla ze země pomocí zemního kolektoru a vrtu
Obr.11	Žádosti o připojení do ES ČR
Obr.12	Průměrné roční hodnoty slunečního svitu v ČR
Obr.13	Jak se vyvíjely výkupní ceny elektrické energie z fotovoltaických elektráren
Obr.14	Počet žádostí o připojení a instalovaný výkon FVE k 1.4.2011
Obr.15	Srovnání dodávky výkonu FVE
Obr.16	Území vhodná pro větrné elektrárny v ČR
Obr.17	Histogram rychlosti větru
Obr.18	Princip elektrolyzéru
Obr.19	Princip fungování palivového článku
Obr.20	Palivový článek NEXA Power Modul fy Ballard
Obr.21	Princip přečerpávací vodní elektrárny
Obr.22	Schéma olověného akumulátoru
Obr.23	Ni-Mh akumulátor
Obr.24	Energetická bilance superkondenzátorů
Obr.25	Princip CAES
Obr.26	Princip VRB
Obr.27	Provedení systému vítr/vodík na ostrově Utsira
Obr.28	Technologie skladování vodíku jak do MH, tak do tlakových lahví
Obr.29	Tlakové láhve
Obr.30	Způsob ukládání vodíku do metal-hydridu
Obr.31	Metal-hydridový zásobník
Obr.32	Chlazení metal-hydridového zásobníku
Obr.33	Připojení chlazení k metal-hydridovému zásobníku
Obr.34	Schéma zapojení pro nabíjení metal-hydridového zásobníku
Obr.35	Nabíjení metal-hydridu pouze z elektrolyzérů
Obr.36	Schéma vybíjení zásobníku do palivového článku NEXA
Obr.37	Nabíjení metal-hydridu z tlakových lahví a elektrolyzérů
Obr.38	3. vybíjení metal-hydridového zásobníku do palivového článku
Obr.39	Schéma nabíjení metal-hydridového zásobníku z tlakových lahví a elektrolyzérů
Obr.40	Schéma zapojení 4. vybíjení do palivového článku

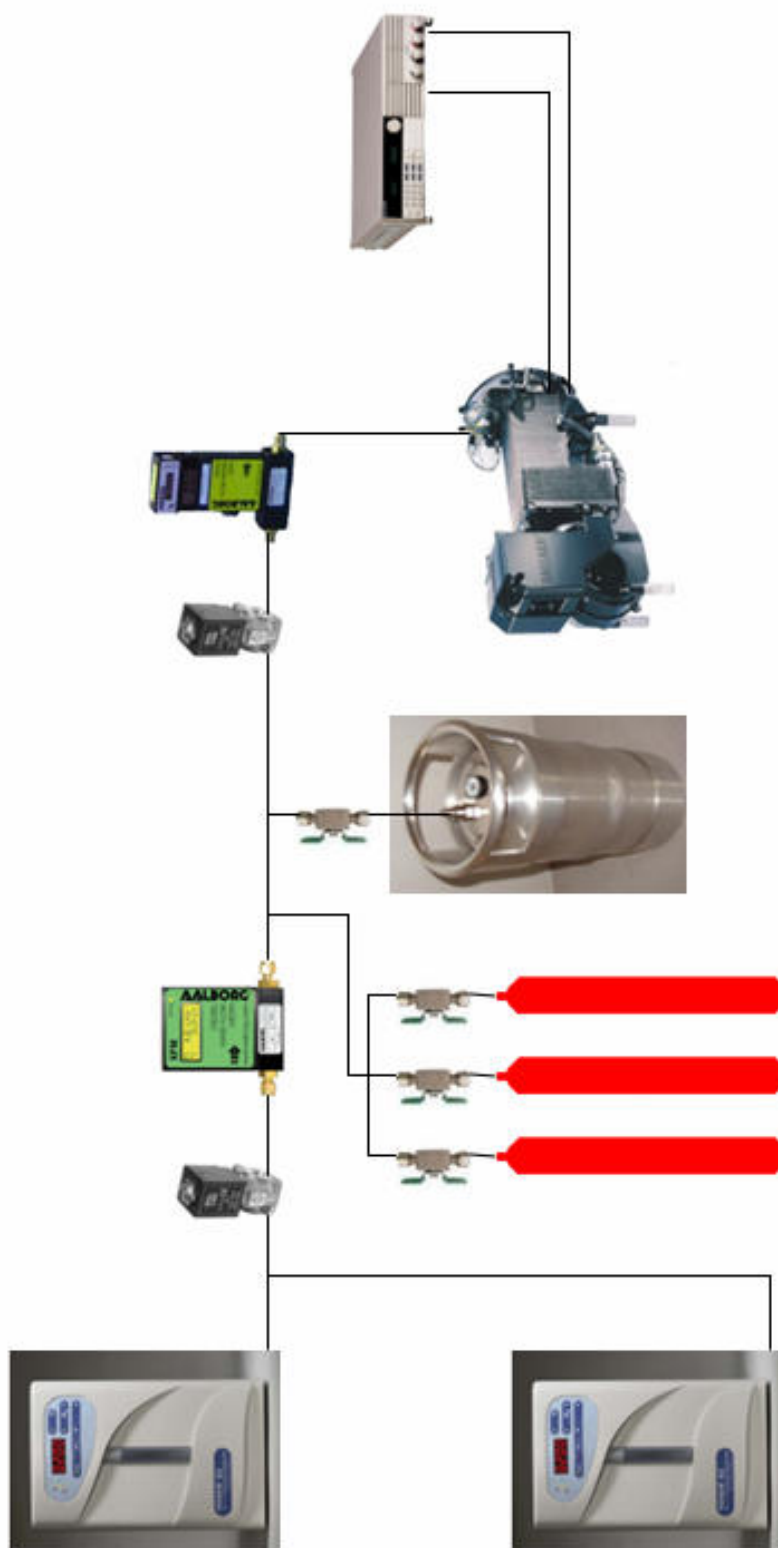
## ***Seznam tabulek***

Tab.1	Parametry ostrovního režimu Utsira
Tab.2	Parametry metal-hydridového zásobníku
Tab.3	Naměřené hodnoty při 1. měření nabíjení metal-hydridového zásobníku
Tab.4	Hodnoty pro 2. nabíjení metal-hydridového zásobníku
Tab.5	Naměřené hodnoty při 2. vybíjení na palivovém článku NEXA
Tab.6	Naměřené hodnoty při 3. měření nabíjení metal-hydridového zásobníku
Tab.7	Naměřené hodnoty při 3. vybíjení
Tab.8	Naměřené hodnoty při 4. plnění metal-hydridového zásobníku
Tab.9	Naměřené hodnoty při 4. vybíjení zásobníku do palivového článku
Tab.10	Zobrazení navrhovaných variant a kritérií pro uložení vodíku
Tab.11	Saatyho matice párového porovnání pro uložení vodíku
Tab.12	Zobrazení vah kritérií s přiřazení maximalizační a minimalizační hodnoty
Tab.13	Výsledky dle WSA
Tab.14	Výsledky dle TOPSIS
Tab.15	Zobrazení navrhovaných variant a kritérií pro akumulaci
Tab.16	Ceny a hmotnosti jednotlivých zařízení
Tab.17	Saatyho matice párových porovnání pro akumulaci
Tab.18	Zobrazení vah kritérií v přiřazením maximalizační a minimalizační hodnoty
Tab.19	Výsledky dle WSA
Tab.20	Výsledky dle TOPSIS

## ***Seznam příloh***

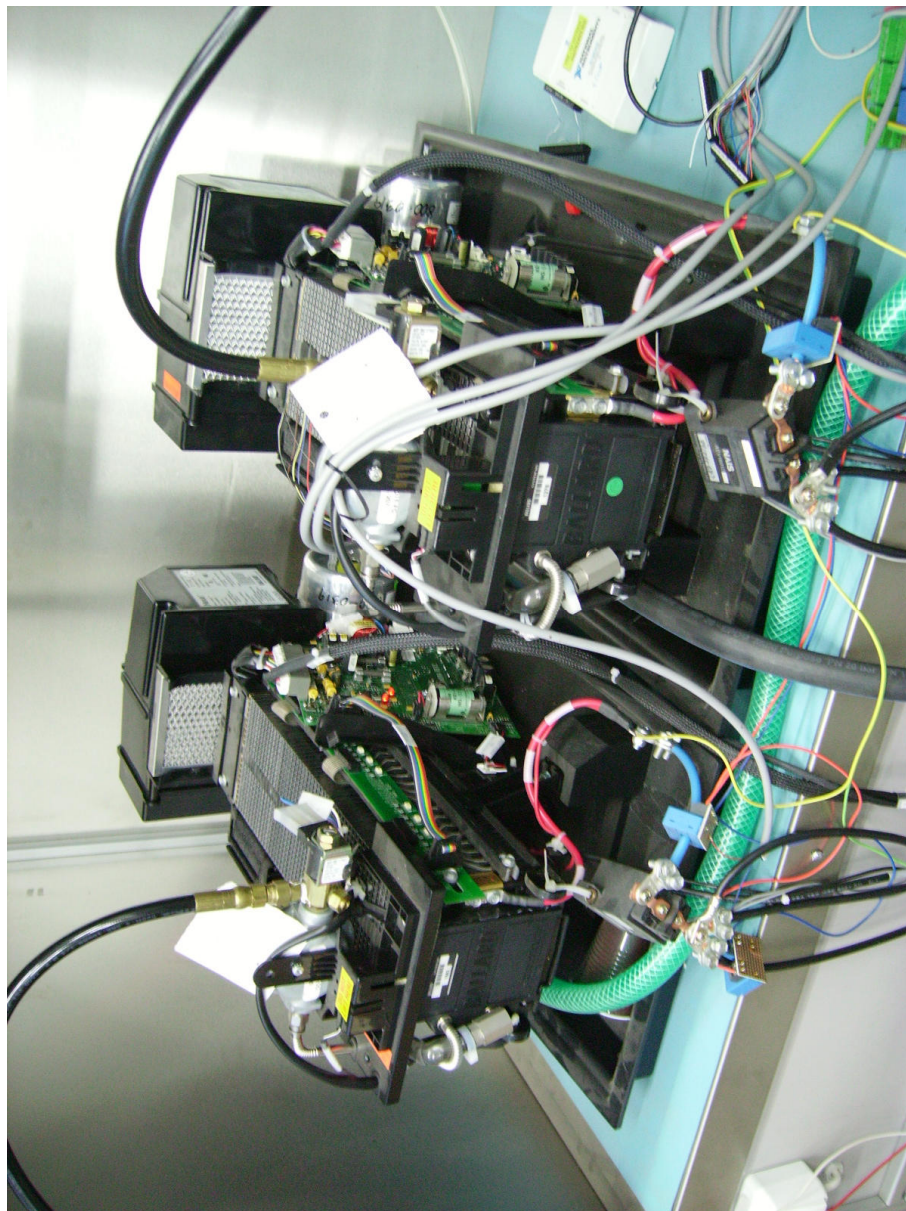
Příloha č.1	Zapojení palivového článku, elektrolyzérů a metal-hydridového zásobníku v laboratoři
Příloha č.2	Palivové články v laboratoři
Příloha č.3	Zobrazení elektrolyzérů a metal-hydridového zásobníku v laboratoři
Příloha č.4	Závislost tlaku a průtoku na čase při 1.nabíjení
Příloha č.5	Závislosti teplot na čase při 1.nabíjení
Příloha č.6	Závislost průtoku a tlaku na čase 2. nabíjení
Příloha č.7	Závislost teplot a množství vodíku akumulovaného v zásobníku při 2. nabíjení
Příloha č.8	Závislost napětí a proudu stacku na čase při připojení zátěže
Příloha č.9	Závislost napětí a proudu stacku na čase při připojení zátěže
Příloha č.10	Závislost výkonů s vlastní spotřebou a bez vlastní spotřeby
Příloha č.11	Závislost průtoku na množství spotřebovaného vodíku s profukem
Příloha č.12	Závislost tlaku systému a množství vodíku v zásobníku během plnění z tlakových lahví při 4.nabíjení
Příloha č.13	Průtok vodíku a tlak v závislosti na čase nabíjení při 4.nabíjení
Příloha č.14	Závislost tlaku a teploty metal-hydridového zásobníku na čase při 4. nabíjení
Příloha č.15	Závislosti teplot a tlaku zásobníku při 4. vybíjení
Příloha č.16	Závislost napětí stacku a průtoku vodíku v čase při 4. vybíjení

Příloha č. 1 - Zapojení palivového článku, metal-hydridu a elektrolyzérů





Příloha č. 2 – Palivové články v laboratoři

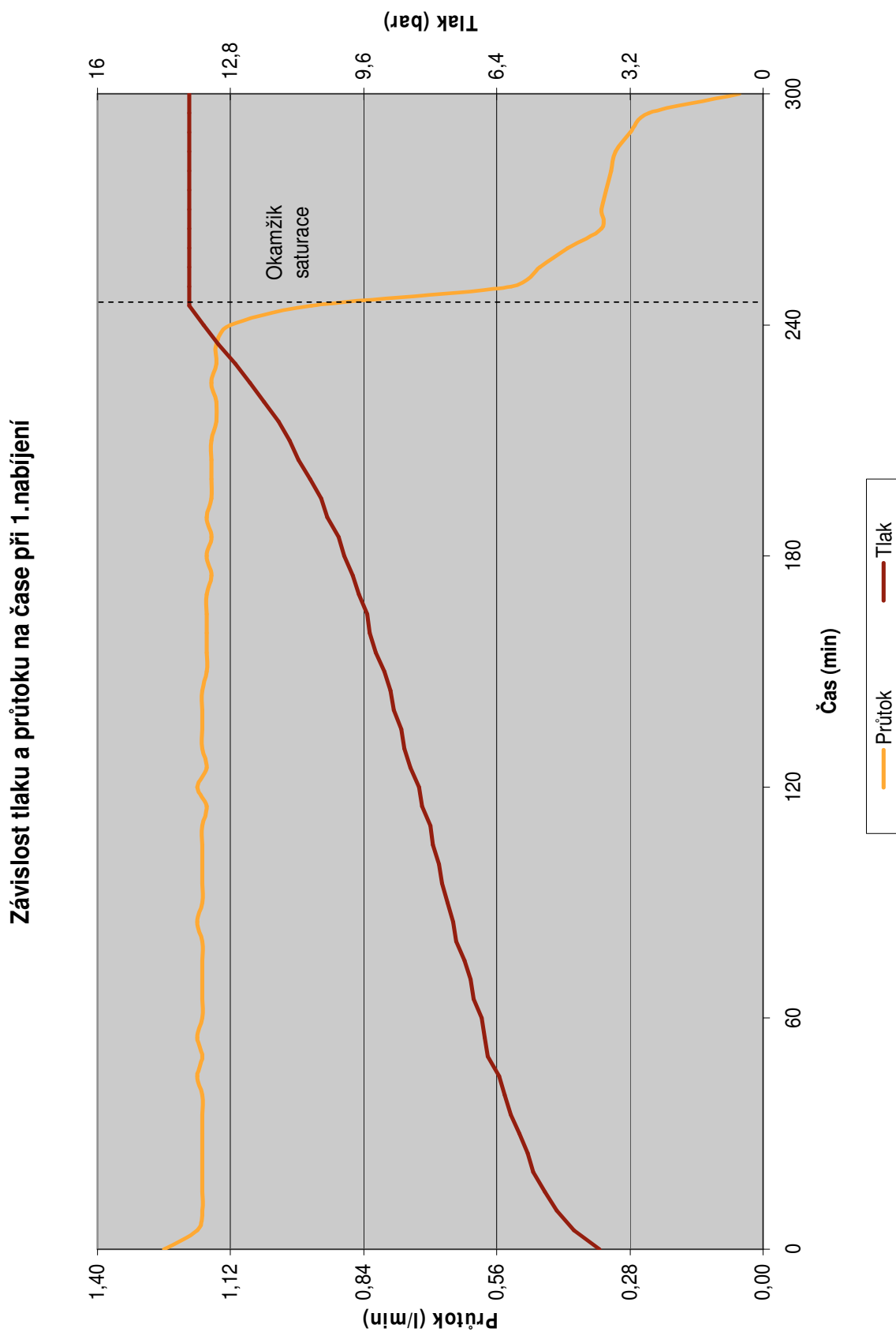




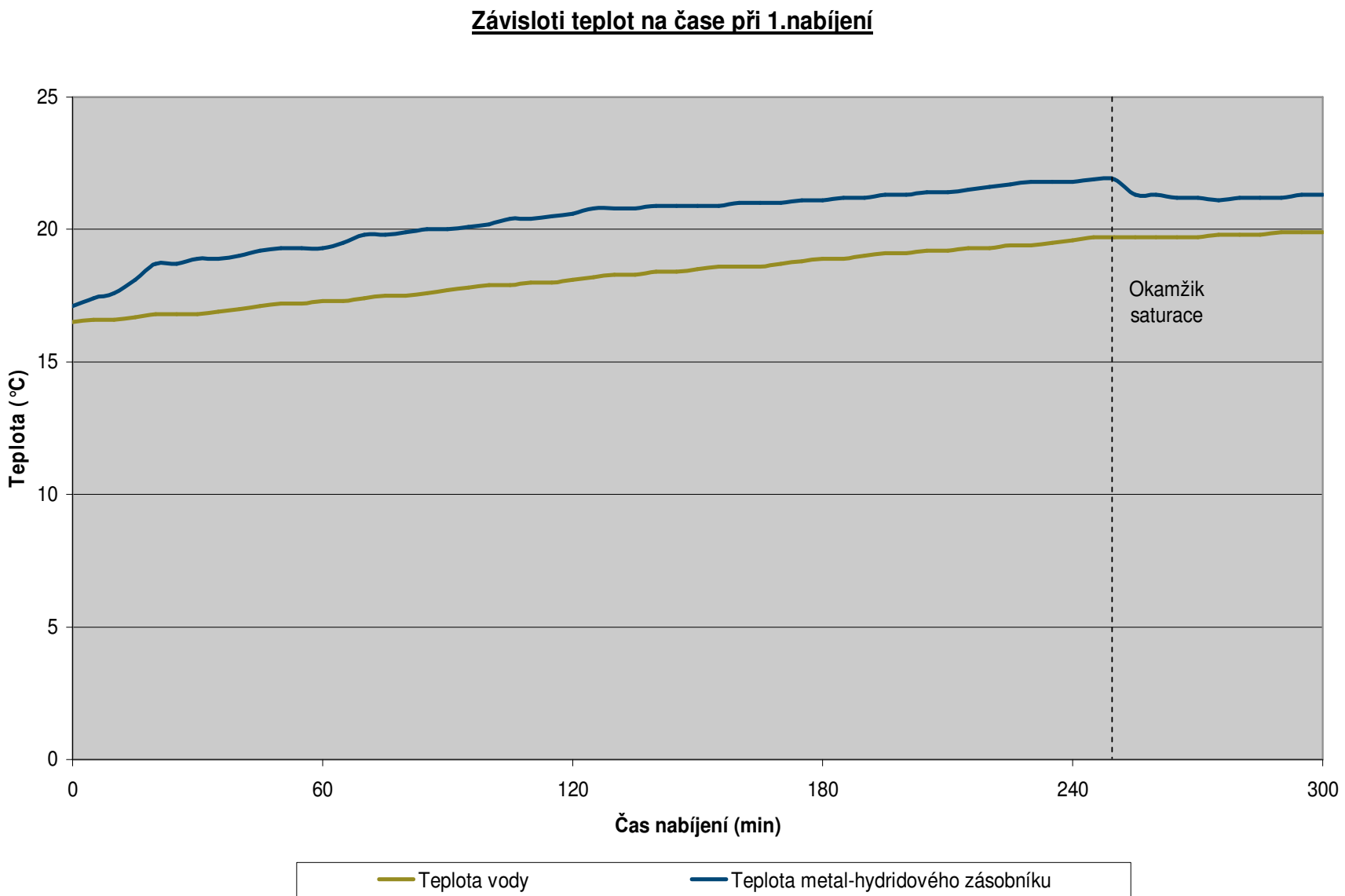
## Příloha č. 3 – Elektrolyzéry a metal-hydrid v laboratoři



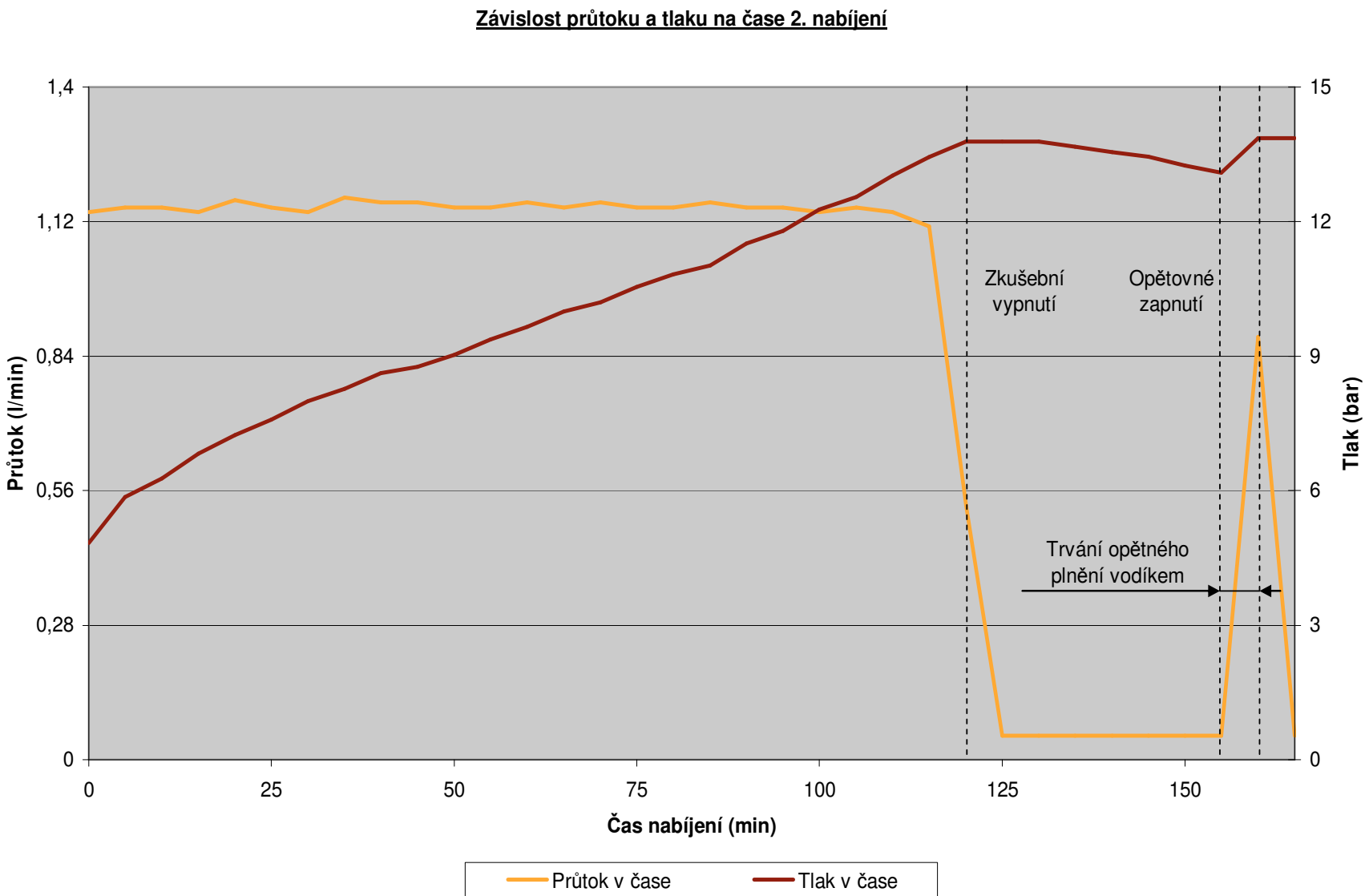
Příloha č. 4 – Závislost průtoku vodíku a tlaku systému na čase při 1.nabíjení



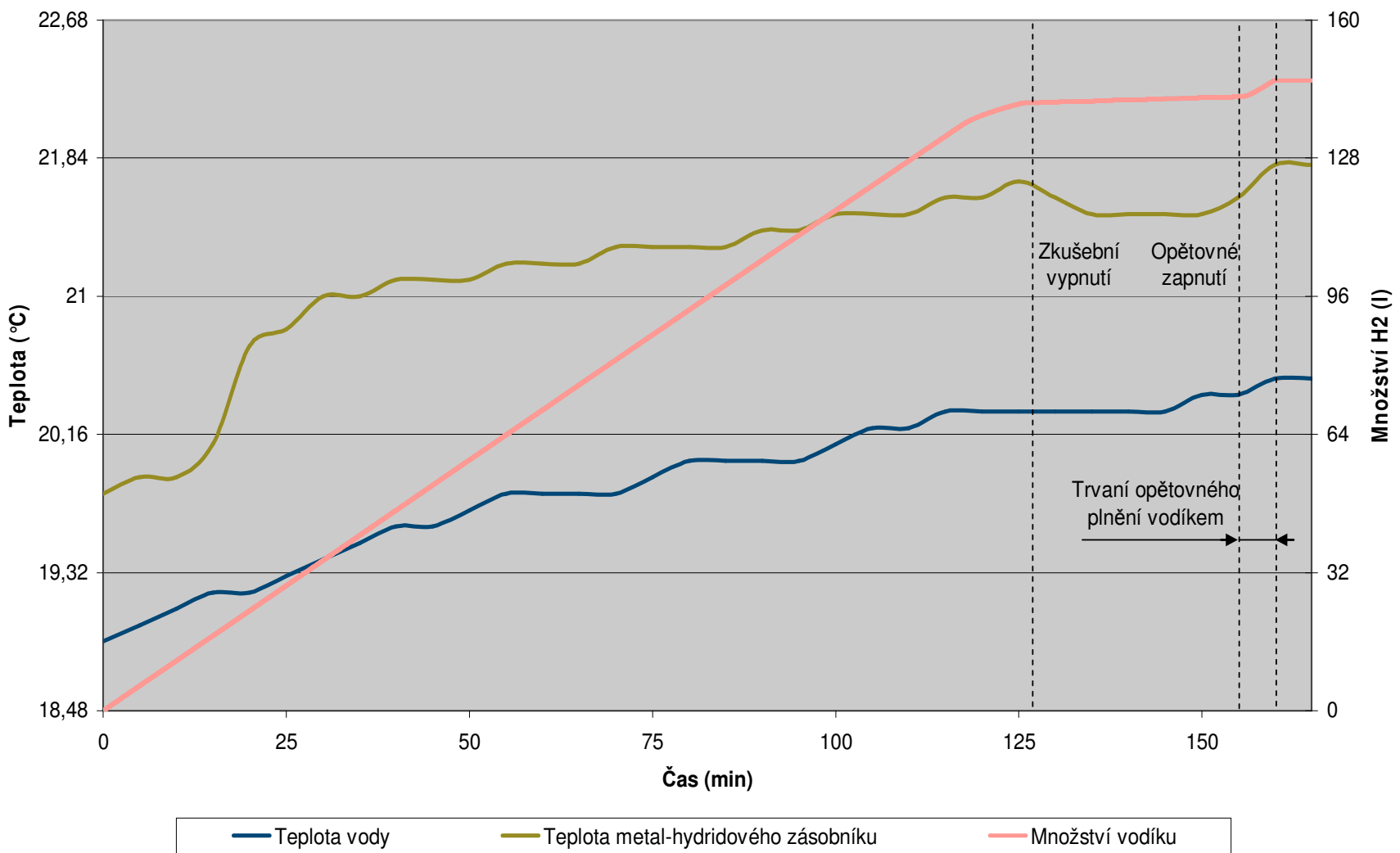
Příloha č. 5 – Závislost teplot na čase při prvním nabíjení



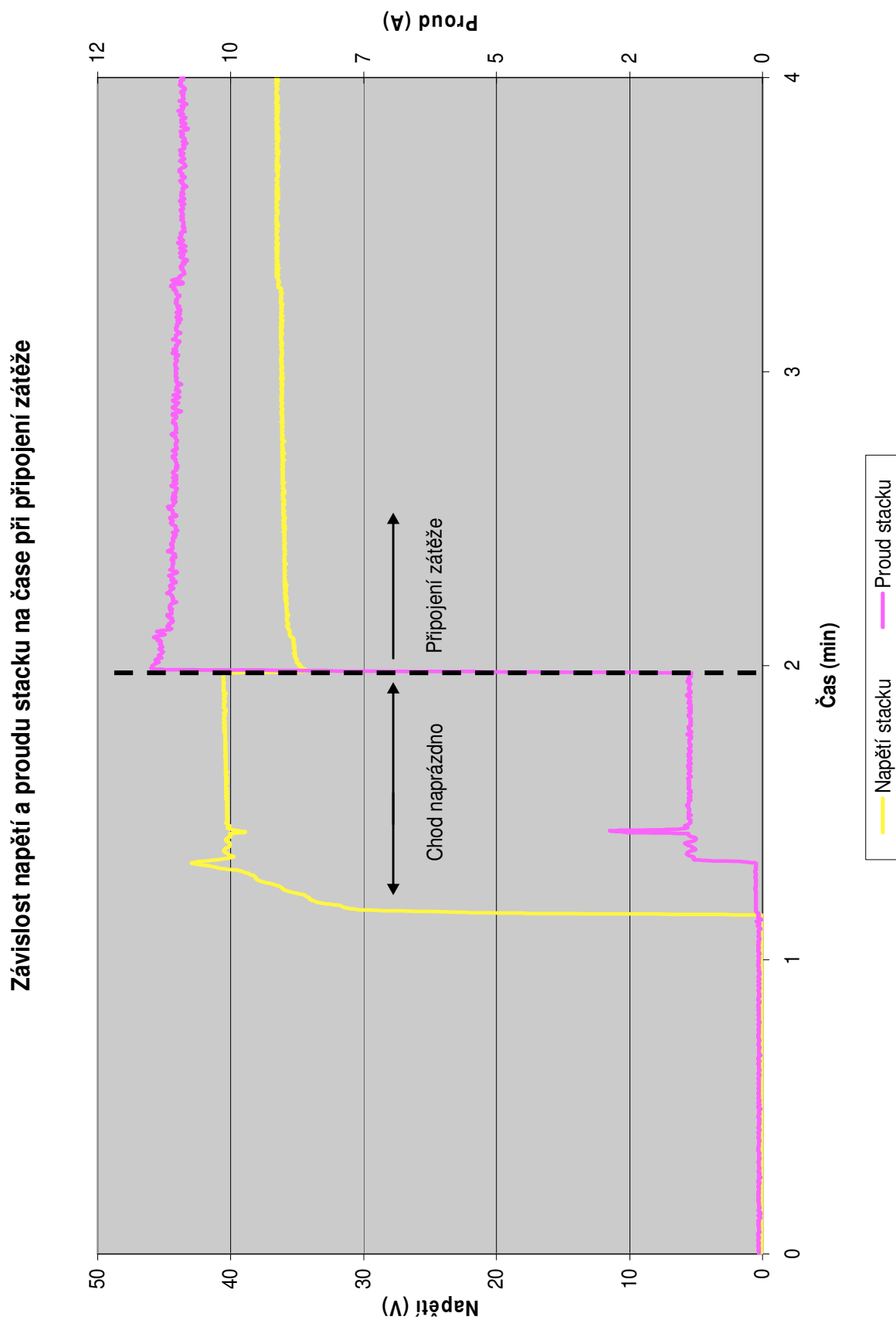
Příloha č. 6 – Závislost průtoku vodíku a tlaku systému na čase při 2. nabíjení



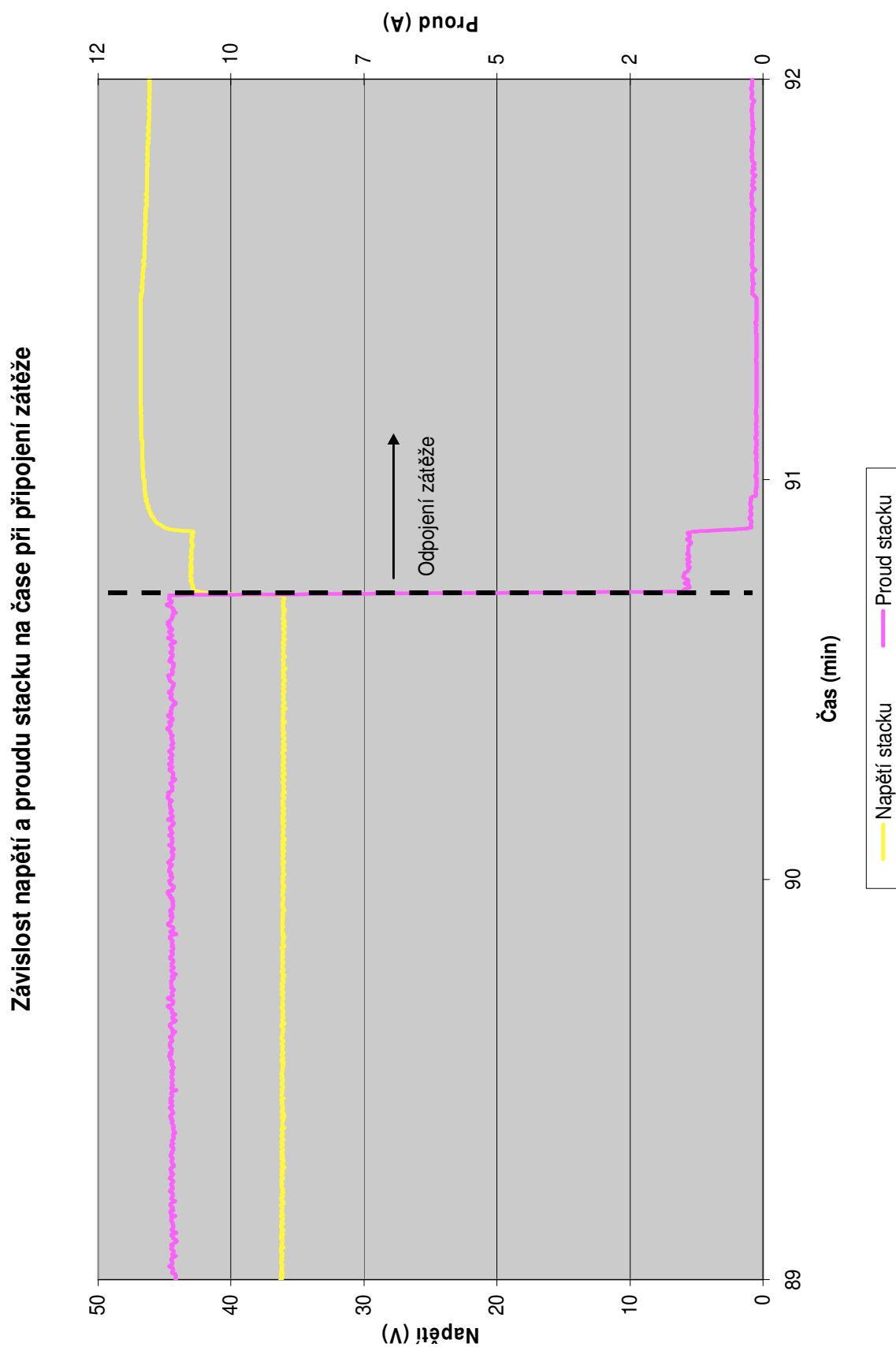
Příloha č. 7 – Závislost teplot a množství vodíku v zásobníku při 2. nabíjení



Příloha č. 8 – Závislost napětí a proudu stacku palivového článku v čase při připojení zátěže

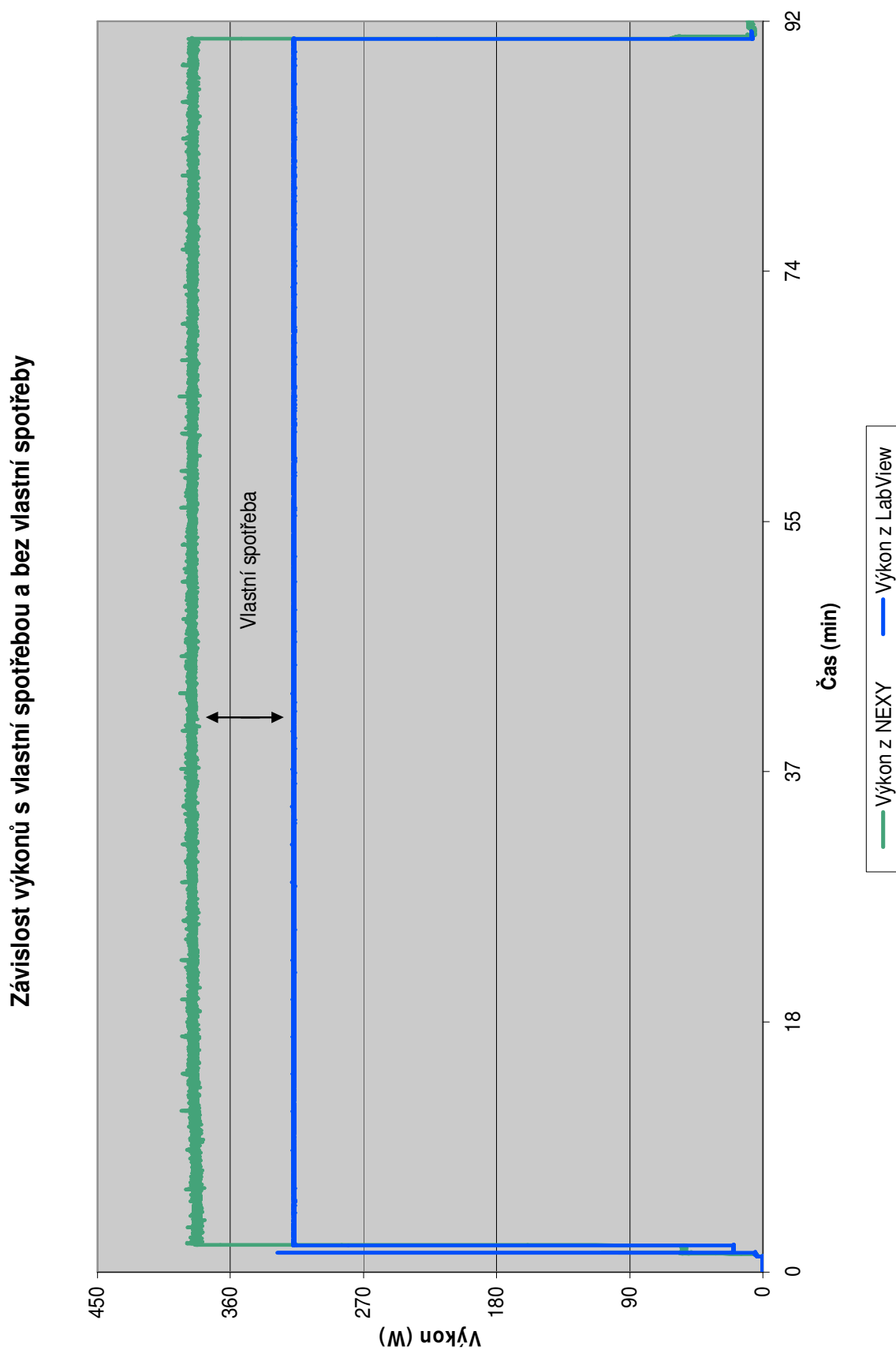


Příloha č. 9 – Závislost napětí a proudu stacku palivového článku při odpojení zátěže

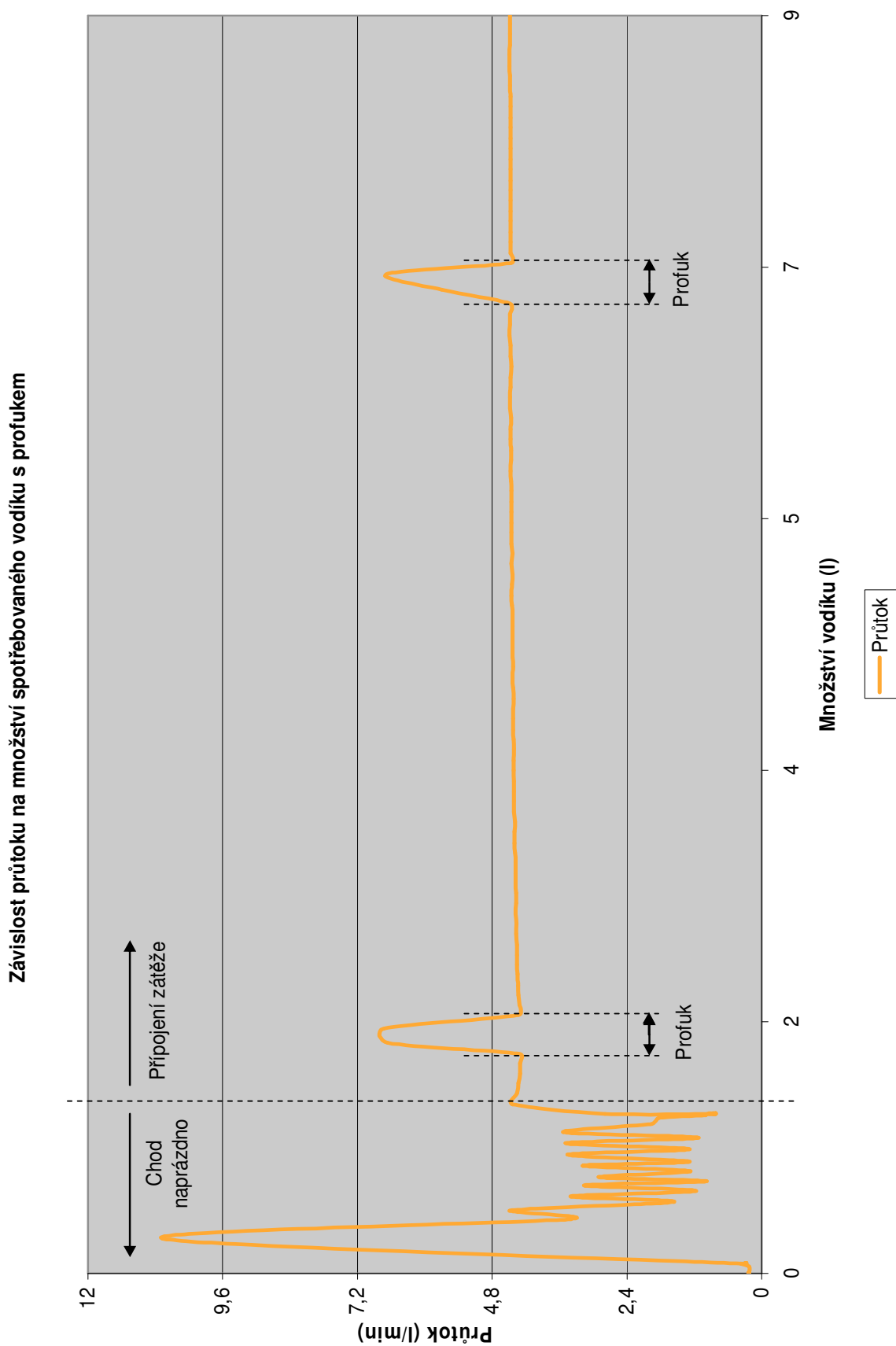




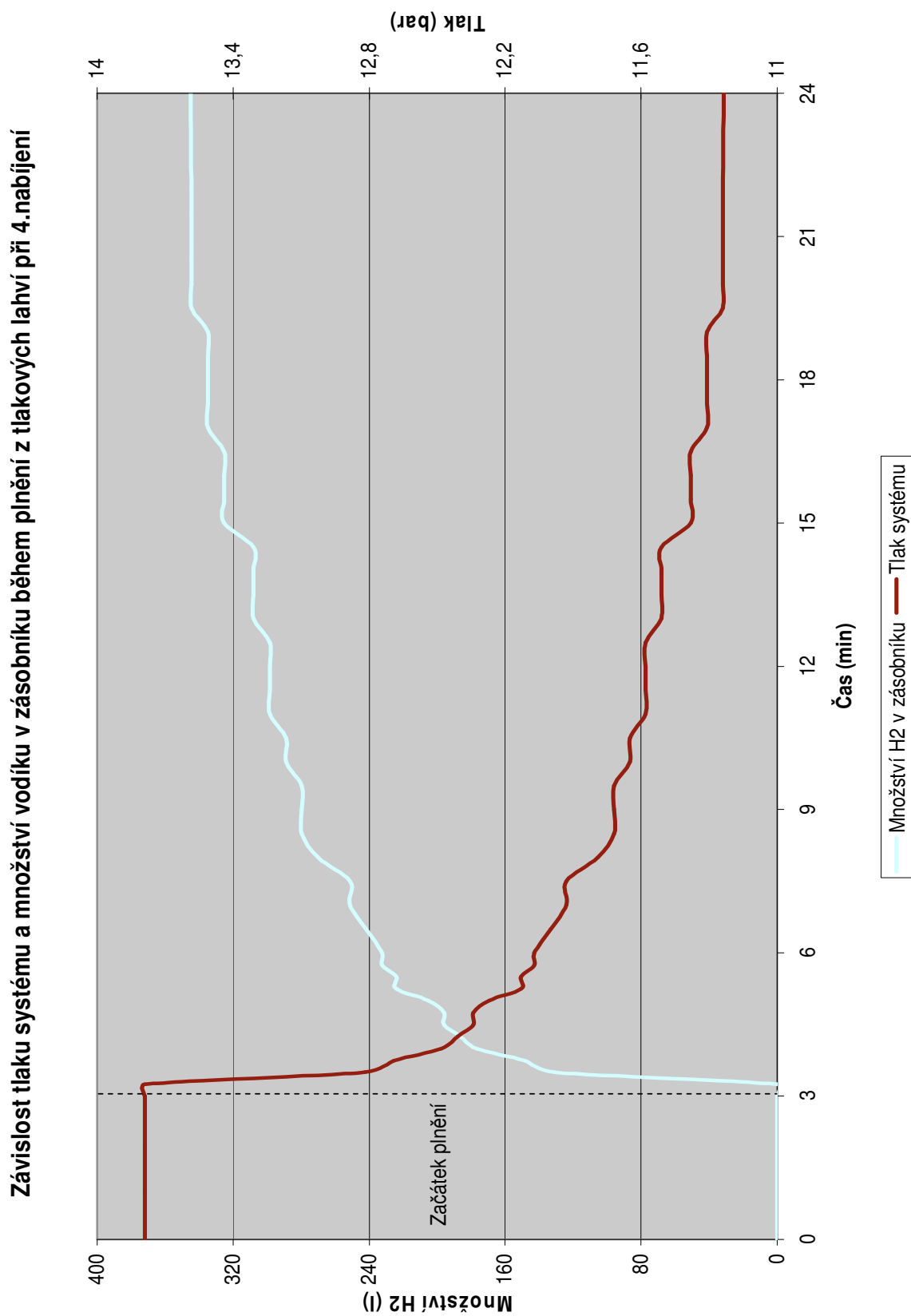
Příloha č. 10 – Závislost výkonů s vlastní spotřebou a bez vlastní spotřeby



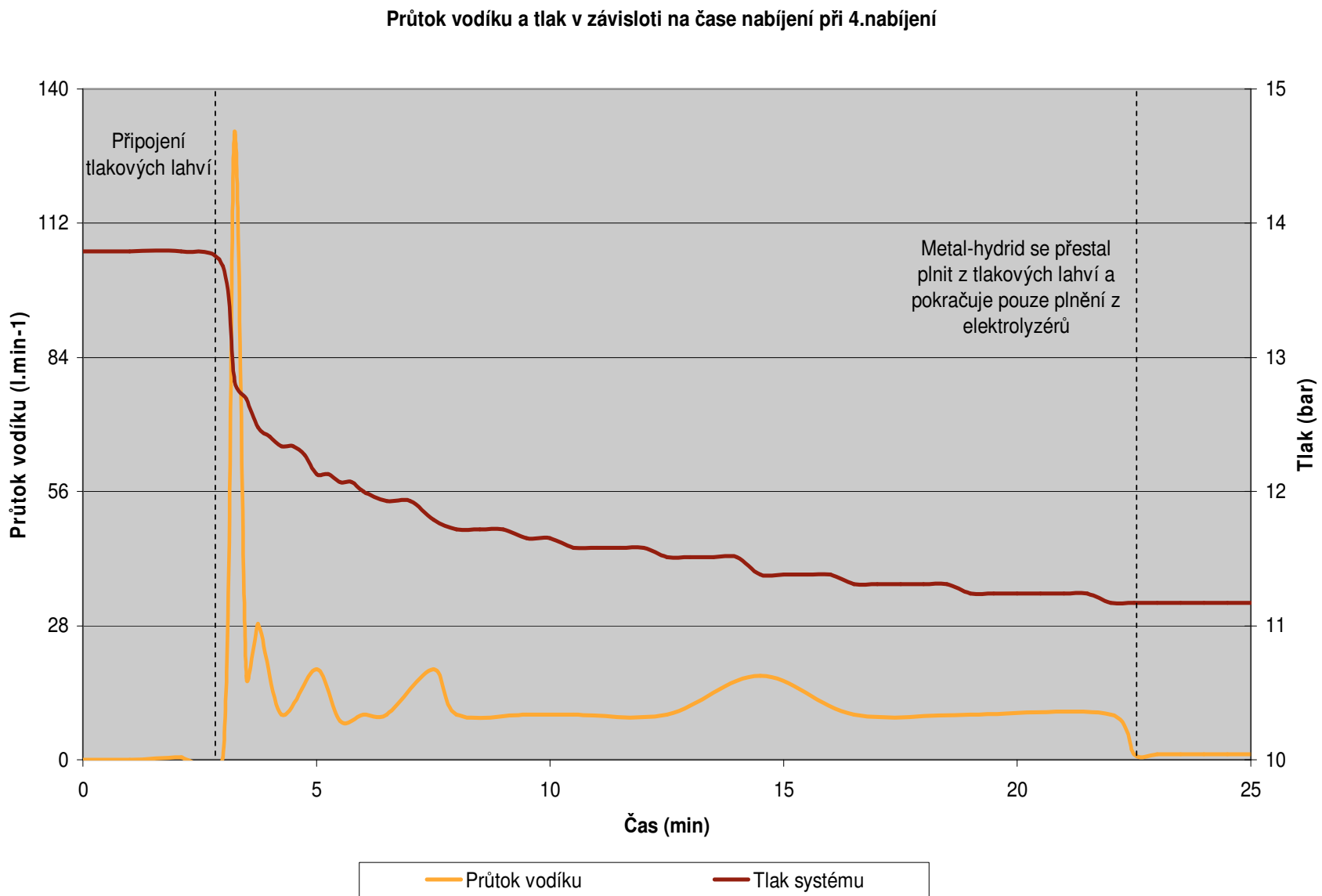
Příloha č. 11 – Závislost průtoku a množství spotřebovaného vodíku s profukem



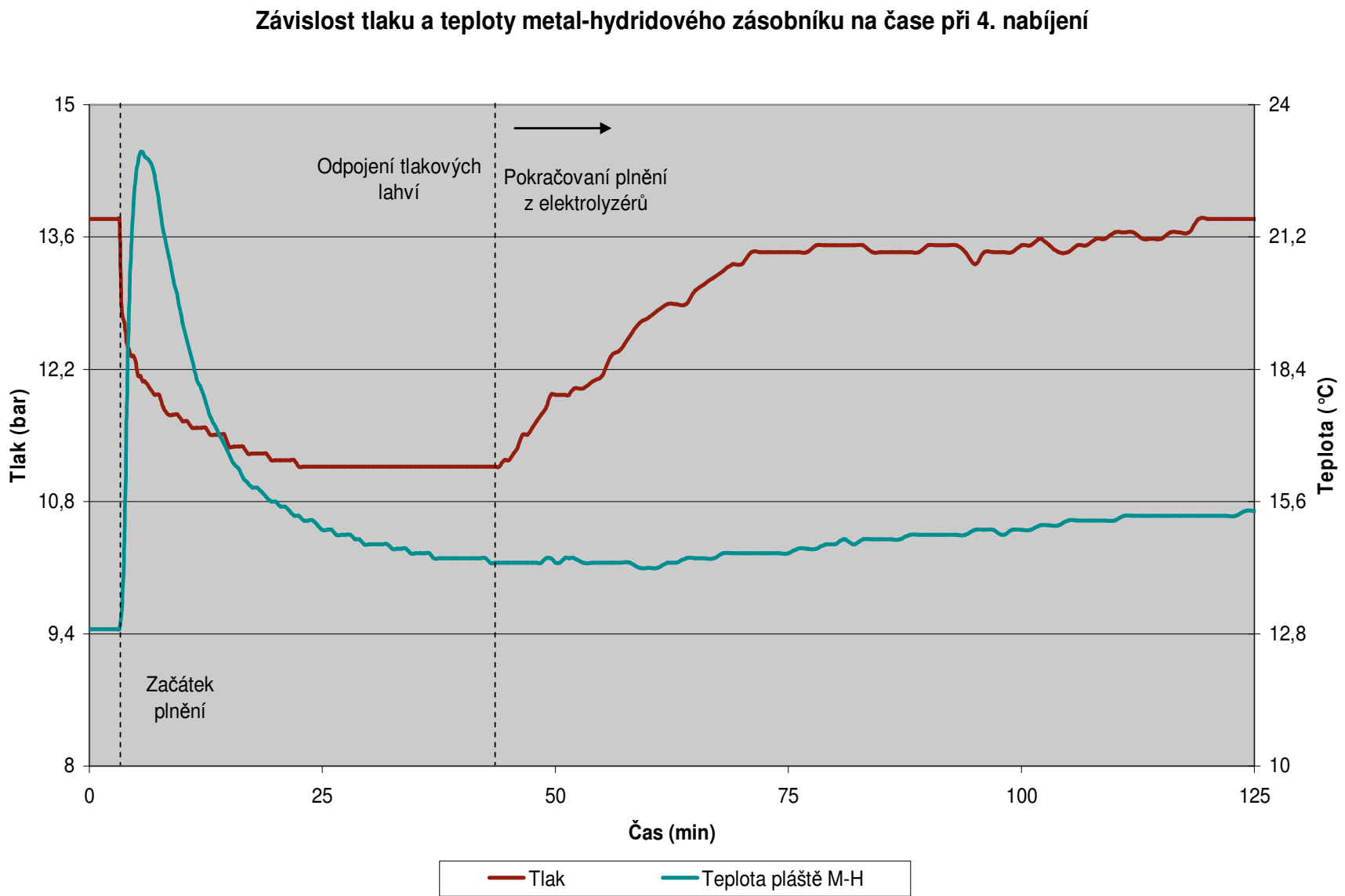
Příloha č. 12 – Závislost tlaku systému a množství vodíku v zásobníku během plnění z tlakových lahví při 4. plnění



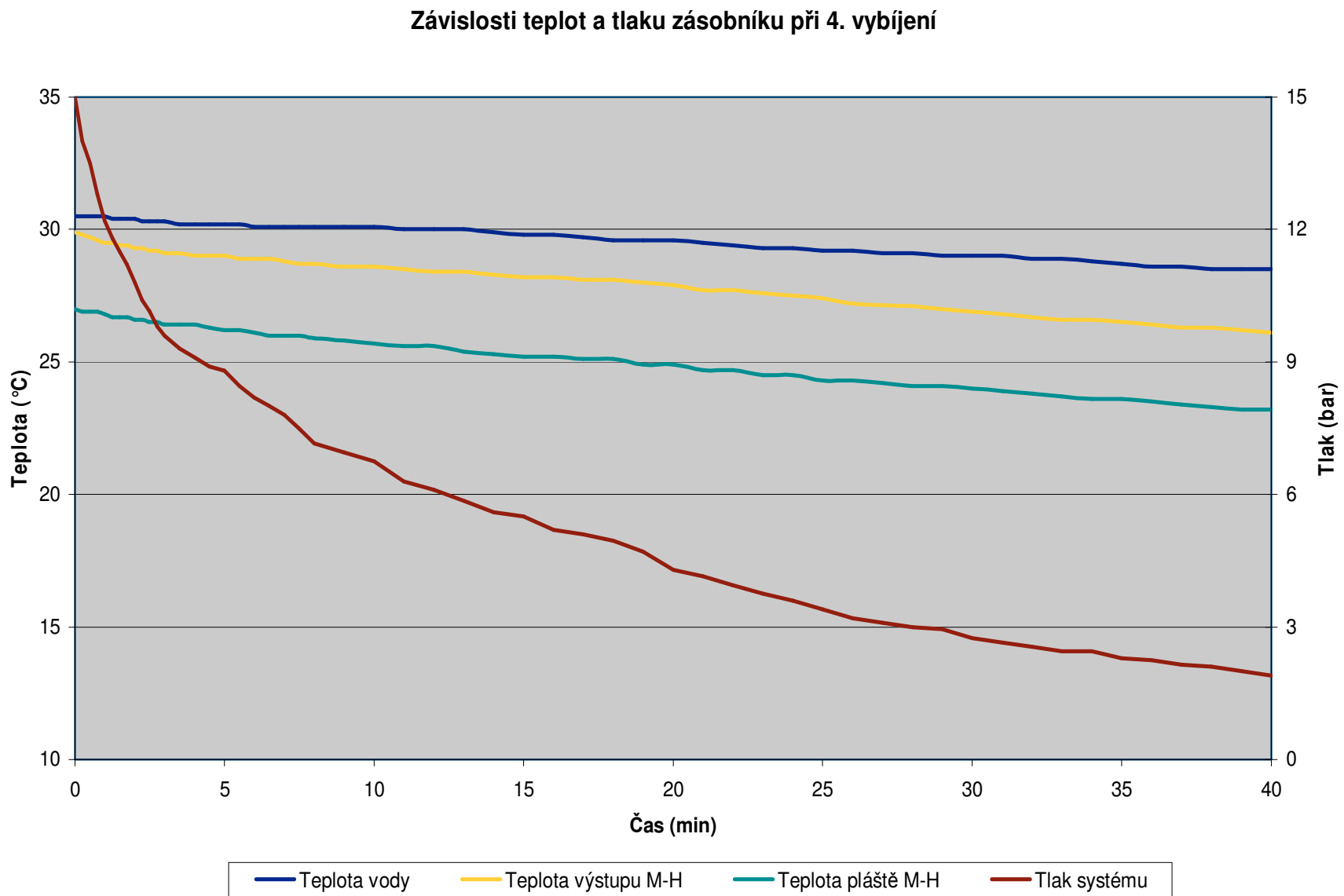
Příloha č. 13 - Průtok vodíku a tlak v závislosti na čase nabíjení při 4.nabíjení



Příloha č. 14 - Závislost tlaku a teploty metal-hydridového zásobníku na čase při 4. nabíjení



Příloha č. 15 - Závislosti teplot a tlaku zásobníku při 4. vybíjení



Příloha č. 16 - Závislost napětí stacku a průtoku vodíku v čase při 4. vybíjení

